



KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH GMBH

Institut für Nukleare Sicherheitsforschung

GESELLSCHAFT FÜR REAKTORSICHERHEIT mbH

**Sicherheitsstudie für HTR-Konzepte
unter deutschen Standortbedingungen**

**Phase I B, Fachband IV:
Einwirkungen von außen**

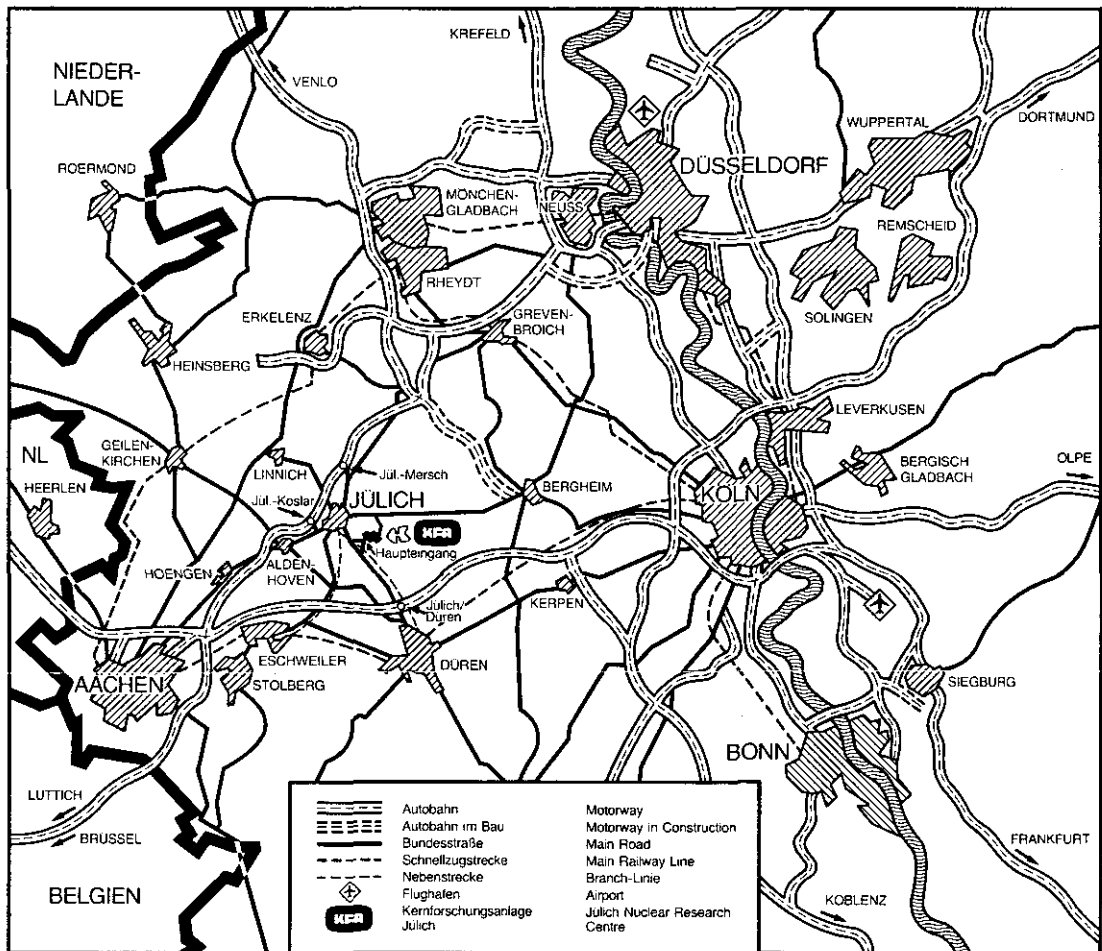
**Übertragung der amerikanischen AIPA-Studie
auf deutsche Verhältnisse unter weitgehender
Beibehaltung der Methoden und Modelle bei
gleichzeitiger Beseitigung von Schwachstellen**

Referenzanlage: HTR-1160

Jül - Spez - 136/Bd. 5

Dezember 1981

ISSN 0343-7639



Als Manuskript gedruckt

Spezielle Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 136/Bd. 5

Institut für Nukleare Sicherheitsforschung Jül - Spez - 136/Bd. 5

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH

Postfach 1913 · D-5170 Jülich (Bundesrepublik Deutschland)

Telefon: 02461/610 · Telex: 833556 kfa d

Sicherheitsstudie für HTR-Konzepte unter deutschen Standortbedingungen

**Phase I B, Fachband IV:
Einwirkungen von außen**

**Übertragung der amerikanischen AIPA-Studie
auf deutsche Verhältnisse unter weitgehender
Beibehaltung der Methoden und Modelle bei
gleichzeitiger Beseitigung von Schwachstellen**

Referenzanlage: HTR-1160

SAFETY STUDY FOR HTR-CONCEPTS UNDER GERMAN SITING CONDITIONS

PHASE I B, Appendix IV : External Impacts

Institut für Nukleare Sicherheitsforschung der Kernforschungsanlage Jülich
(KFA-ISF)¹⁾

Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS)²⁾

SUMMARY

The report presents the investigations which were carried out in the study to answer the question of the significance of external impacts for the risk posed by the HTR conceptual design analyzed. Schmehausen served as the assumed site.

External impacts can initiate incidents which result in a core heat-up and their course can be compared with those initiated by transients (e.g. failure of emergency power). However, due to the slight occurrence frequency of external impacts and the protective precautions taken, their frequency is much lower than that of initiating events within the plant, so that they do not provide any sizable contributions to the risk. The investigations are in part associated with considerable uncertainties which can be decreased by further research projects, which are largely already in progress.

¹⁾ Institute for Nuclear Safety Research at the Nuclear Research Centre Jülich

²⁾ Society for Reactor Safety

SICHERHEITSSTUDIE FÜR HTR-KONZEPTE UNTER DEUTSCHEN STANDORTBEDINGUNGEN
PHASE I B, Fachband IV: Einwirkungen von außen

Institut für Nukleare Sicherheitsforschung der Kernforschungsanlage Jülich (KFA-ISF)
Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS)

Kurzfassung

Der Bericht stellt die Arbeiten dar, die in der Studie zur Beantwortung der Frage durchgeführt wurden, welche Bedeutung Einwirkungen von außen für das Risiko des analysierten HTR-Konzepts haben. Als angenommener Standort diente Schmehausen.

Einwirkungen von außen können Störfälle auslösen, die in eine Kernaufheizung münden und in ihrem Ablauf den durch Transienten ausgelösten (z.B. Notstromfall) vergleichbar sind. Ihre Häufigkeit ist aber aufgrund der geringen Eintrittshäufigkeit äußerer Einwirkungen und der getroffenen Schutzvorkehrungen viel niedriger als für anlageninterne auslösende Ereignisse, so daß nicht mit größeren Beiträgen zum Risiko zu rechnen ist. Die Untersuchungen sind zum Teil mit großen Unsicherheiten behaftet, die durch weitere, meist schon laufende Forschungsvorhaben verringert werden können.

Vorwort

Der Bundesminister des Innern (BMI) fördert seit 1977 eine probabilistische Sicherheitsstudie für HTR-Konzepte, mit dem Ziel, Hinweise zur sicherheitstechnischen Einordnung dieses Reaktortyps und für Optimierungsmöglichkeiten zu erhalten. In der Phase I B dieses Vorhabens wurde die amerikanische Accident Initiation and Progression Analysis (AIPA) auf deutsche Verhältnisse unter weitgehender Beibehaltung der Methoden und Modelle bei gleichzeitiger Beseitigung von Schwachstellen übertragen.

Das Institut für Nukleare Sicherheitsforschung der Kernforschungsanlage Jülich GmbH (KFA-ISF), die Gesellschaft für Reaktorsicherheit mbH (GRS) und weitere Institutionen haben die Arbeiten durchgeführt. Die fachliche Leitung der Studie lag bei W. Kröger, KFA-ISF.

Die Ergebnisse der Analysen sind in einem Hauptband zusammengefaßt. Die Analysen selbst sind in Fachbänden dokumentiert:

- F I : Allgemeine Methoden, Daten, Modelle
- F II : Transienten mit Kernaufheizung
- F III: Lecks im Primärkreislauf
- F IV : Einwirkungen von außen
- F V : Kommentare anderer, Änderungen an der Systemauslegung

Der vorliegende Fachband gibt einen Überblick über mögliche Risikobeiträge, die nicht durch anlageninterne Ereignisse hervorgerufen werden, sondern durch Einwirkungen von außen. Ein Schwerpunkt der Untersuchungen waren Erdbeben, die in ihrer Stärke noch das für die Auslegung unterstellte Sicherheitserdbeben überschreiten. Die Beiträge A.1 und A.2 geben Auskunft über Lastannahmen und Überschreitenswahrscheinlichkeiten. In Beitrag A.3 werden daraus Beanspruchungen der wichtigsten Bauteile und Komponenten berechnet, auf deren Basis in den Beiträgen A.4 und A.5 Versagenswahrscheinlichkeiten abgeschätzt werden. Die Untersuchungen haben vorläufigen Charakter und erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Ähnliches gilt auch für die übrigen Einwirkungen von außen, auf die Teil B dieses Berichtes eingeht.

Der Bericht gibt die Meinung und Auffassung der Auftragnehmer wieder und muß nicht mit der des auftraggebenden BMI übereinstimmen.

**SICHERHEITSSTUDIE FÜR HTR-KONZEPTE
UNTER DEUTSCHEN STANDORTBEDINGUNGEN**

PHASE I B, FACHBAND IV: EINWIRKUNGEN VON AUSSEN

A. ERDBEBEN

A.1 Lastannahmen und Überschreitenswahrscheinlichkeiten

L. Ahorner, Erdbebenstation der Universität Köln in Berg.-Gladbach

A.2 Stellungnahme zu A.1

H.J. Kaestle, GRS

**A.3 Beanspruchung von Reaktorschutzgebäude, Spannbetonbehälter
und Komponenten**

J. Altes, D. Koschmieder, KFA-ISF

A.4 Versagenswahrscheinlichkeit von Komponenten des Nachkühlsystems

S. Beliczey, GRS

A.5 Versagen von Bauteilen

K. Schimmelpfennig, R. Zinn - Zerna, Schnellenbach und Partner

B. SONSTIGE EINWIRKUNGEN VON AUSSEN

H. Liemersdorf, GRS

A. 1 LASTANNAHMEN UND ÜBERSCHREITENSWAHRSCHEINLICHKEITEN

L. Ahorner, Erdbebenstation der Universität Köln in Bergisch-Gladbach

INHALT	Seite
1. Allgemeine Beurteilung der Erdbebengefährdung am Standort	1
2. Überschreitenswahrscheinlichkeiten für Erdbebenlasten	2
3. Standortbezogene Beschleunigungs-Antwort-Spektren und Zeitverläufe	3
4. Dauer der starken Bodenbewegung	4
Schrifttum	5
Abbildungen	6

1. Allgemeine Beurteilung der Erdbebengefährdung am Standort

Die Erdbebengefährdung am Standort Schmehausen wurde von L. Ahorner (1974) in einem seismologischen Standortgutachten für das KKW Schmehausen untersucht. Dabei wurden folgende Bemessungserdbeben vorge= schlagen:

Auslegungserdbeben AE	Intensität I_{AE} = V-VI MSK-Skala
Sicherheitserdbeben SE	Intensität I_{SE} = VI-VII MSK-Skala

Die maximale horizontale Bodenbeschleunigung wurde für die beiden Bemessungserdbeben wie folgt festgelegt:

Auslegungserdbeben AE	Bodenbeschleunigung $b_{AE,h}$ = 0,05g
Sicherheitserdbeben SE	Bodenbeschleunigung $b_{SE,h}$ = 0,1 g

Da sich an den allgemeinen Grundlagen der Beurteilung des seismischen Gefährdungspotentials im Raum Schmehausen seit dem oben angeführten Gutachten nichts geändert hat, können die damals festgelegten Last= annahmen für die Bemessungserdbeben auch im Rahmen der Sicherheits= studie HTR verwendet werden.

2. Überschreitenswahrscheinlichkeiten für Erdbebenlasten

Bei der Ermittlung der Überschreitenswahrscheinlichkeiten für seismi= sche Bodenschwinggrößen am Standort Schmehausen wird von einem groß= räumigen Seismizitätsmodell ausgegangen, welches von AHORNER & ROSEN= HAUER (1975) für den nordwestdeutschen Bereich auf Grund der histori= schen Erdbebenbeobachtungen und der geologisch-tektonischen Verhält= nisse aufgestellt wurde. Das Modell liefert Angaben über die Eintritts= wahrscheinlichkeit von Erdbebenmagnituden in den verschiedenen Herd= gebieten. Mit Hilfe geeigneter Abnahmegesetze können daraus die Aus= wirkungen auf einen Standort im Abstand R vom Erdbebenherd berechnet werden. Durch Aufsummieren der Auswirkungen aller potentiellen Erd= bebenherde in der näheren und weiteren Umgebung eines Standortes er= hält man eine standortspezifische Wahrscheinlichkeitsverteilung der seismischen Lastannahmen.

Für den Standort Schmehausen wurden die Auswirkungen aller bekannten Herdgebiete im Umkreis bis zu 200 km betrachtet. Den größten Einfluß auf das Gefährdungspotential hat das Herdgebiet der Niederrheinischen Bucht, welches 100 bis 150 km vom Standort entfernt liegt. In der Nie= derrheinischen Bucht muß man mit Erdbeben bis zur Magnitude $M=6$ und Epizentralintensität $I_0=VIII$ MSK-Skala rechnen.

Die Berechnung der standortspezifischen Wahrscheinlichkeitsverteilung vorgegebener Erdbebenintensitäten bzw. Bodenschwinggrößen erfolgte nach drei unterschiedlichen Rechenmodellen:

Im Rechenmodell 1 wurde in Anlehnung an AHORNER & ROSENHAUER (1975) ein Beschleunigungsabnahmegesetz benutzt, um die Auswirkungen eines Erdbebens der Magnitude M auf den Standort in der Herdentfernung R zu berechnen. Das auf ESTEVA (1970) zurückgehende Gesetz hat die Form

$$b = 1230 e^{0,8 M} (R + 13)^{-2}$$

Die Bodenbeschleunigung b wird in cm/s^2 und die Herdentfernung R in km angegeben.

Im Rechenmodell 2 wurde das von AHORNER & ROSENHAUER (1978) vorgeschlagene Intensitätsabnahmegesetz

$$I = 2 M - 3 \log R - 3 \cdot 10^{-3} (R-10) + 0,3$$

zu Grunde gelegt. Die Intensität I wird nach der MSK-Skala und die Magnitude M nach der Richter-Skala angegeben. Bei der Ableitung dieser Formel wurde von der Beziehung zwischen Magnitude M , Herdtiefe h und Epizentralintensität I_0 ausgegangen, welche KARNIK (1969) für den europäischen Raum durch die Auswertung zahlreicher Erdbeben gefunden hat.

Im Rechenmodell 3 wurde ein modifiziertes Intensitätsabnahmegesetz verwendet, welches sich aus einer speziellen Untersuchung der Magnitude-Intensitäts-Beziehung bei mitteleuropäischen Erdbeben ergibt (AHORNER & ROSENHAUER 1979)

$$I = 1,5 M - 3 \log R - 3 \cdot 10^{-3} (R - 10) + 2,0$$

Das neue Intensitätsabnahmegesetz liefert bei gleicher Magnitude etwas geringere standortbezogene Intensitäten. Als Magnitude wird hier die sogenannte Lokalbebenmagnitude M_{loc} eingesetzt.

Für die Umrechnung der Erdbebenintensität I in die maximale Bodenbeschleunigung b_{max} wurde die Formel von MURPHY & O'BRIEN (1977) benutzt

$$\log b_{max,h} = 0,25 I + 0,25 \quad b_{max} \text{ in } \text{cm/s}^2$$

Die Ergebnisse der probabilistischen Risikoanalyse für den Standort Schmehausen sind in der Abb.1 in Diagrammform dargestellt. Es ist die jährliche Überschreitenswahrscheinlichkeit W_j für seismische Bodenbeschleunigungen nach den oben beschriebenen Rechenmodellen angegeben. Die Rechenmodelle liefern wegen der Unsicherheit der Ausgangsdaten recht unterschiedliche Ergebnisse. Hieraus wird deutlich, daß alle Angaben über die Wahrscheinlichkeiten bestimmter Erdbebenbeschleunigungen am Standort Schmehausen mit einem Standardfehler von ± 1 Größenordnung behaftet sind und nur mit entsprechendem Vorbehalt verwertet werden dürfen.

Diese Einschränkung gilt im vollen Umfang auch für die vorgeschlagene mittlere Wahrscheinlichkeitskurve (dicke ausgezogene Kurve im Diagramm), welche der probabilistischen Sicherheitsstudie HTR (PSH) zweckmäßigerweise zu Grunde gelegt werden soll. Nach dieser Kurve ergeben sich folgende Richtwerte für die jährliche Überschreitenswahrscheinlichkeit $W_{\bar{U}}$:

Bodenbeschleunigung			Überschreitenswahrscheinlichkeit	
$b_{\max,h}$			$W_{\bar{U}}/a$	
0,025	g		2,8	10^{-3}
0,05	g	AE	1,5	10^{-4}
0,1	g	SE	1,3	10^{-5}
0,2	g		7,5	10^{-7}
0,3	g		8,4	10^{-8}
0,4	g		1,0	10^{-8}

Die Wahrscheinlichkeitswerte für Bodenbeschleunigungen größer als 0,2 g sind sehr unsicher.

3. Standortbezogene Beschleunigungs-Antwort-Spektren und Zeitverläufe

Passende Beschleunigungs-Antwort-Spektren für den Standort Schmehausen sind in der Abb.2 dargestellt. Die Spektren wurden durch Modifikation der Standardantwortspektren der USAEC gewonnen und sind auf die Grundbeschleunigung $b = 1$ als Einhängewert bei Frequenzen über 33 Hz normiert. Eine Umrechnung auf andere Grundbeschleunigungen ist durch einfache Multiplikation der spektralen Beschleunigungswerte möglich. Die vorgeschlagenen Spektren unterscheiden sich von den USAEC-Standardspektren vor allem im niederfrequenten Bereich (Frequenzen kleiner als etwa 2 Hz), da bei mitteleuropäischen Erdbeben wegen der begrenzten Magnituden (und damit Herdlängen) im niederfrequenten Spektralbereich weniger Energie abgestrahlt wird als bei den starken amerikanischen Erdbeben.

Die vorgeschlagenen Spektren stellen 84%-Spektren dar (Mittelwert plus 1 Standardabweichung).

Bezüglich eines passenden Beschleunigungszeitverlaufes wird empfohlen, einen künstlichen Zeitverlauf zu generieren, welcher den Spektren so gut wie möglich entspricht.

Zur Kontrolle kann als natürlicher Zeitverlauf das Beschleunigungsseismogramm des Erdbebens von San Francisco am 22.März 1957 (Golden Gate Park, Magnitude $M=5,3$, Intensität $I=VII$, Maximalbeschleunigung $b_{\max}=0,13$ g) dienen. Die Beschleunigungswerte dieses Seismogramms sind auf die maximalen Beschleunigungswerte des Sicherheitserdbebens SE (0,1 g) und des Auslegungserdbebens AE (0,05g) am Standort Schmehausen umzurechnen.

4. Dauer der starken Bodenbewegung

Für die Generierung des künstlichen Beschleunigungszeitverlaufes muß die Dauer der starken Bodenbewegung bekannt sein. Diese ergibt sich für den herdnahen Bereich aus der Dauer des seismischen Bruchprozesses, welcher von der Herdausdehnung und der Bruchgeschwindigkeit bestimmt wird. Da die Herdausdehnung mit der Magnitude eines Bebens zusammenhängt, läßt sich über diese Größe die Dauer der sogenannten "Strong-Motion-Phase" eines Erdbebens abschätzen. GUTENBERG & RICHTER (1956) haben hierfür die empirische Beziehung

$$\log t_0 = 0,32 M - 1,4 \quad t_0 \text{ in Sekunden}$$

aus zahlreichen Erdbeben in Kalifornien abgeleitet.

Wenn man davon ausgeht, daß das Sicherheitserdbeben am Standort Schmehausen durch das stärkste im Bereich der Niederrheinischen Bucht zu erwartende Erdbeben der Magnitude $M=6$ hervorgerufen wird (Herdentfernung minimal $R = 100 \text{ km}$), folgt für die Dauer der starken Bodenbewegung nach der obigen Formel

$$\begin{aligned} \log t_0 &= 0,32 \cdot 6 - 1,4 = 0,52 \\ t_0 &= 3,3 \text{ sec} \end{aligned}$$

Da der Standort nicht in direkter Herdnähe liegt, muß mit einer etwas größeren Zeitdauer gerechnet werden.

Es wird deshalb vorgeschlagen, für die Dauer der starken Bodenbewegung beim Sicherheitserdbeben mit

$$t_0 = 3 - 5 \text{ sec}$$

zu rechnen. Damit ist die seismische Belastung in konservativer Weise abgedeckt. Zum Vergleich sei erwähnt, daß das Hauptbeben in Friaul am 6. Mai 1976 mit Magnitude $M=6,5$ in Herdnähe eine Dauer der starken Bodenbewegung von etwa 4 sec aufwies. Das schwere Schadenbeben auf der Schwäbischen Alb am 3. September 1978 bei Albstadt dauerte etwa 2 sec (Magnitude $M=5,7$, Epizentralintensität $I_0=\text{VII-VIII}$).

Schrifttum

AHORNER, LUDWIG : Seismologisches Gutachten für das neue Kernkraftwerk Schmehausen bei Hamm. Abgabetermin 25.8.1974

AHORNER, L., ROSENHAUER, W.: Probability distribution of earthquake accelerations with applications to sites in the Northern Rhine area, Central Europe. - J.Geophys.41, 581-594, 1975

AHORNER, L., ROSENHAUER, W.: Seismic risk evaluation for the Upper Rhine Graben and its vicinity. - J.Geophys.44, 481-497, 1978

ESTEVA, L.: Seismic risk and seismic design decisions. In: HANSEN (Edit.), Seismic Design for Nuclear Power Plants. - Cambridge, Mass.: M.I.T. press 1970

GUTENBERG, B. & RICHTER, C.F.: Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration. - Bull.Seism.Soc.America 46, 105-145, 1956

KARNIK, V.: Seismicity of the European area. Part 1. 364p. Dordrecht: Reidel 1969

MURPHY, J.R. & O'BRIEN, L.J.: The correlation of peak ground acceleration amplitude with seismic intensity and other physical parameters. - Bull.Seism.Soc.America 67, 877-915, 1977

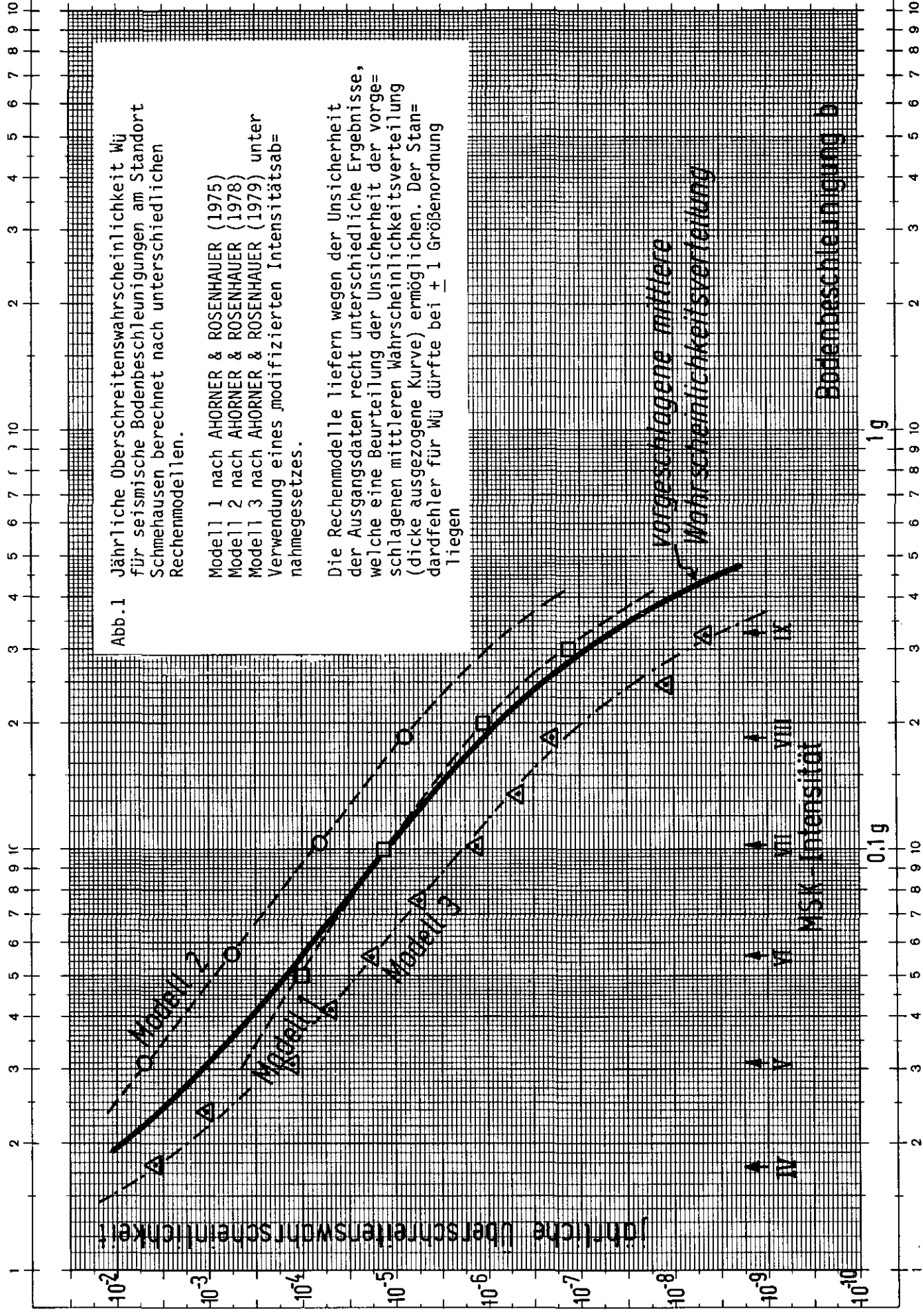
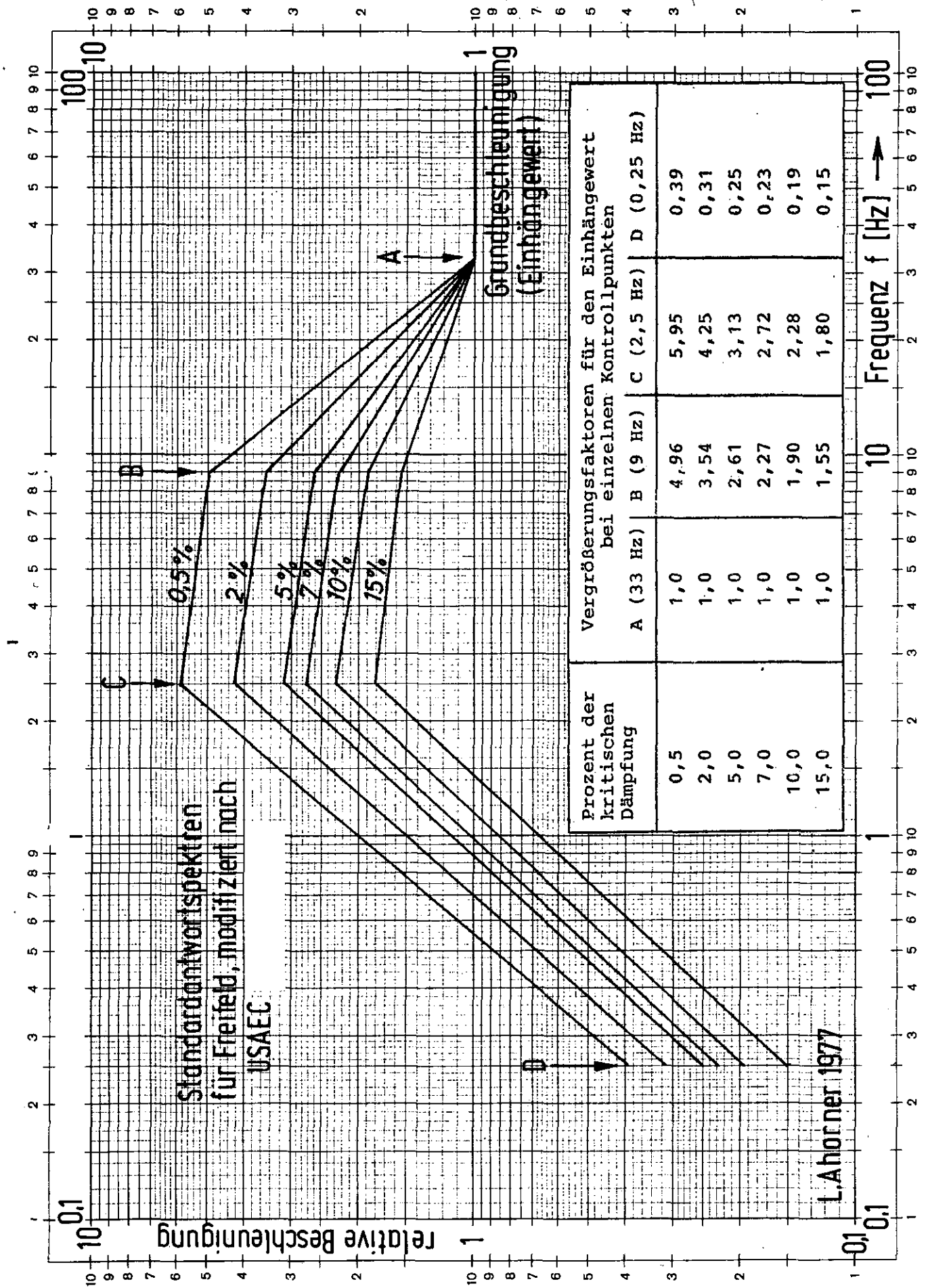


Abb.1 Jährliche Überschreitungswahrscheinlichkeit W_j für seismische Bodenbeschleunigungen am Standort Schmehausen berechnet nach unterschiedlichen Rechenmodellen.

Modell 1 nach AHORNER & ROSENHAUER (1975)
 Modell 2 nach AHORNER & ROSENHAUER (1978)
 Modell 3 nach AHORNER & ROSENHAUER (1979) unter Verwendung eines modifizierten Intensitätsabnahmegesetzes.

Die Rechenmodelle liefern wegen der Unsicherheit der Ausgangsdaten recht unterschiedliche Ergebnisse, welche eine Beurteilung der Unsicherheit der vorgeschlagenen mittleren Wahrscheinlichkeitsverteilung (dicke ausgezogene Kurve) ermöglichen. Der Standardfehler für W_j dürfte bei ± 1 Größenordnung liegen

Abb.2



Prozent der kritischen Dämpfung	Vergrößerungsfaktoren für den Einhängewert bei einzelnen Kontrollpunkten			
	A (33 Hz)	B (9 Hz)	C (2,5 Hz)	D (0,25 Hz)
0,5	1,0	4,96	5,95	0,39
2,0	1,0	3,54	4,25	0,31
5,0	1,0	2,61	3,13	0,25
7,0	1,0	2,27	2,72	0,23
10,0	1,0	1,90	2,28	0,19
15,0	1,0	1,55	1,80	0,15

A.2 STELLUNGNAHME ZU A.1

(Lastannahmen und Überschreitenswahrscheinlichkeiten
der Lastannahmen für Erdbeben am Standort Schmehausen)

H.J. Kaestle, GRS

INHALT	Seite
1. Erdbebengefährdung	1
2. Überschreitenswahrscheinlichkeit von Erdbebenlasten	1
3. Response-Spektren	4
4. Dauer der starken Bodenbeschleunigungen	5
Schrifttum	6

1. Erdbebengefährdung

Zur Beurteilung der Erdbebengefährdung und zur Festlegung der Lastannahmen für Erdbeben am Standort Schmehausen liegt das Gutachten /1/ vor. Hierin sind die Intensitäten der Bemessungserdbeben und die zugehörigen Beschleunigungswerte angegeben.

Ausgehend von einer Intensität $J = 5 - 6$ (MSK-Skala) für das Auslegungserdbeben und $J = 6 - 7$ für das Sicherheitserdbeben sind als maximale horizontale Bodenbeschleunigungen

- für das Auslegungserdbeben
max. $a = 50 \text{ cm/s}^2$
- für das Sicherheitserdbeben
max. $a = 100 \text{ cm/s}^2$

angegeben.

Diese Lastannahmen entsprechen dem derzeitigen Wissenstand über die Erdbebentätigkeit in dem zu betrachtenden Gebiet und wurden entsprechend den Festlegungen der inzwischen gültigen KTA Regel 2201.1/2/ ermittelt. Diese Beschleunigungswerte liegen im Bereich der Mittelwerte von mehreren Intensitäts-Beschleunigungskorrelationen, wie sie z.B. für Kalifornien erstellt wurden und in der Regel /2/ empfohlen sind. Für die Bundesrepublik Deutschland können derartige Korrelationen (Kalifornien) aufgrund ähnlicher bzw. übertragbarer Erdbebentätigkeit (z.B. Herdmechanismen, Herdtiefen) angewendet werden. Desgleichen wird durch die Beschleunigungswerte die Entfernung zu den maßgebenden Erdbebenherden (ca. 100 bis 150 km) berücksichtigt.

2. Überschreitenswahrscheinlichkeit von Erdbebenlasten

Unter Verwendung des seismologischen Gutachtens /1/ wurde eine Untersuchung zur Überschreitenswahrscheinlichkeit für Erdbebenlasten /3/ erarbeitet.

Grundlage für statistische Erdbebenuntersuchungen sind die für die Bundesrepublik Deutschland in verhältnismäßig großer Anzahl vorliegenden makroseismischen Erdbebendaten (für einen Zeitraum von ca. 1.000 Jahren) d.h. Aufzeichnungen über die bei Erdbeben beobachteten Wirkungen und Schäden (Intensitäten).

Diese Daten zeigen, wie für andere Erdbebengebiete auch, daß sich Erdbeben nicht gleichförmig im Gebiet der Bundesrepublik Deutschland verteilen und auch innerhalb seismisch aktiver Zonen ungleichförmig verteilt sind. Auch in zeitlicher Hinsicht treten Erdbeben häufig konzentriert auf, was sich in sogenannten Erdbebenserien am deutlichsten zeigt.

Da also Erdbeben sowohl zeitlich als auch örtlich durchaus voneinander abhängige Ereignisse sein können, ist eine wesentliche Voraussetzung einer statistischen Betrachtung des Erdbebenrisikos, nämlich die Zufälligkeit der einzelnen Ereignisse, verletzt.

Dies schränkt die Aussagefähigkeit statistischer Betrachtungen zum Erdbebenrisiko ein, insbesondere kann eine statistische Erdbebenvorhersage nicht den Anspruch erheben, Aussagen über ein einzelnes zukünftiges Ereignis zu machen. Jedoch sind Aussagen über Eigenschaften vergangener bzw. zukünftiger statistischer Verteilungen von Erdbebenrisiken möglich. Unter Berücksichtigung dieser Aspekte sind statistische Erdbebenbetrachtungen zu bewerten.

In der Untersuchung /3/ werden Überschreitenswahrscheinlichkeiten für Erdbeben am Standort Schmehausen angegeben. Dabei wurden unter Verwendung von historischen makroseismischen Erdbebendaten mit Hilfe von verschiedenen Rechenmodellen Überschreitenswahrscheinlichkeiten für Erdbebenintensitäten und -beschleunigungen für den untersuchten Standort ermittelt. Alle Rechenmodelle liefern unterschiedliche und mit großen Standardfehlern behaftete Ergebnisse.

Sofern die angegebenen Überschreitenswahrscheinlichkeiten sich auf Erdbebenintensitäten beziehen, kann der in /3/ angegebene

Standardfehler von ± 1 Größenordnung als realistisch angesehen werden und befindet sich in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen einer methodisch gleichartigen Untersuchung für ein größeres Gebiet vom gleichen Autor /4/, so daß am Standort Schmehausen von folgenden Werten, gemäß Abb. 1 aus /3/, ausgegangen werden kann:

Intensität	Überschreitenswahrscheinlichkeit
J	$W_{\ddot{u}} / a$
5	10^{-3}
5 - 6 (Auslegungserdbeben)	$5 \cdot 10^{-4}$
6	10^{-4}
6 - 7 (Sicherheitsbeben)	$5 \cdot 10^{-5}$
7	10^{-5}

Soll jedoch eine Wahrscheinlichkeitsaussage zu den zu Bodenbeschleunigungen gemacht werden, so vergrößert sich der Standardfehler beträchtlich, da keine Zuordnung von Bodenbeschleunigungen zu Intensitäten, die für eine solche Aussage angenommen werden muß, eindeutige Werte liefern kann.

Dies gilt insbesondere für die Bundesrepublik Deutschland, für die keine geeigneten Beschleunigungsmessungen vorliegen.

Die in /3/ benutzte Zuordnung zwischen Intensität und Bodenbeschleunigungen /5/ liefert aus mehreren Gründen sehr unsichere und für Deutschland kaum repräsentative Werte.

Sie basiert auf sehr vielen Daten aus allen Erdbebengebieten der Erde. Hierbei werden sehr unterschiedliche Verhältnisse hinsichtlich Erdbebenstärken, Herdtiefen, Entfernungen u.a. berücksichtigt, die in ihrer Gesamtheit für kein spezielles Erdbebengebiet charakteristisch sind.

Wegen der Einbeziehung sehr unterschiedlicher seismologischer Verhältnisse sind die Streuungen gemessener Beschleunigungswerte in /5/ besonders für Intensitätswerte $J = 5$ bis $J = 7$ sehr groß. So reichen gemessene Beschleunigungen für $J = 5$ bis $\max a = \text{ca. } 450 \text{ cm/sec}^2$, für $J = 6$ bis $\max a = 650 \text{ cm/sec}^2$

für $J = 7$ bis $\max a = \text{ca. } 500 \text{ cm/sec}^2 /5/$.

Aus diesen Gründen sollten Aussagen zur Überschreitenswahrscheinlichkeit bestimmter Bodenbeschleunigungen, sofern sie unter Zuhilfenahme von Intensitäts-Beschleunigungskorrelationen gewonnen werden, nur mit äußerster Vorsicht behandelt werden.

Nach /3/ sind für den Standort Schmehausen für Bodenbeschleunigungswerte von 200, 300 und 400 cm/s^2 Überschreitenswahrscheinlichkeiten von resp. $7,5 \cdot 10^{-7}$, $8,4 \cdot 10^{-8}$ und $1,0 \cdot 10^{-8}$ anzunehmen. Derartige Werte können über die o.a. Gesichtspunkte hinaus als rein theoretisch und spekulativ bezeichnet werden, da hinsichtlich der Erdbebentätigkeit von den vorhandenen Daten für ca. 1000 Jahre nicht ohne weiteres auf rein theoretischer Basis beliebig auf sehr große Zeiträume extrapoliert werden kann. Nimmt man z.B., wie in /3/ als maßgebend, für die Erdbebengefährdung am Standort Herdgebiete in 100 ~ 150 km Entfernung an, so müßten dort, um die o.g. Erdbebenlasten in Schmehausen zu erzeugen, Erdbebenstärken unterstellt werden, die nach seismologischen Erkenntnissen über die Spannungsverteilung in der Erdkruste ausgeschlossen werden können.

3. Response-Spektren

Standortbezogene Response-Spektren für den Standort Schmehausen können aufgrund fehlender Daten in der Bundesrepublik Deutschland nicht angegeben werden. Es muß daher auf Spektren aus anderen Erdbebengebieten zurückgegriffen werden.

Die in /3/ empfohlenen Standardspektren gemäß USAEC Regulatory Guide 1.60 sind nach heutigem Wissensstand am besten als Berechnungsgrundlage zur Erdbebenauslegung geeignet. Sie sind aus den Antwortspektren zahlreicher Erdbeben entwickelt und gelten für guten bis mittleren Baugrund (Fels, Sedimente). Eine Anpassung an die Baugrundverhältnisse am Standort ist nicht nötig. Sie käme nach den Festlegungen des R.G. 1.60 nur für ungewöhnlich weichen Baugrund in Frage. Abgedeckt wird fer-

ner der weitere Frequenzbereich, der für den Standort wegen der unterschiedlichen in Frage kommenden Erdbebenherde (auch Gebirgsschläge) zu berücksichtigen ist.

4. Dauer der starken Bodenbeschleunigungen

Für die Ermittlung der Dauer starker Bodenbeschleunigungen ist man aufgrund fehlender Daten auf Messungen in anderen Erdbebengebieten oder Beobachtungen angewiesen.

Empirische Beziehungen zur Ermittlung der Dauer starker Bodenbeschleunigungen existieren nur in geringem Umfang. Die in /3/ benutzte Formel nach Gutenberg Richter (1956) liefert zumindest Anhaltswerte. Unter Berücksichtigung von Beobachtungen, wie sie in /3/ zur Absicherung der mit Hilfe der Formel nach Gutenberg Richter ermittelten Werte herangezogen wurden, ist eine Dauer der starken Bodenbeschleunigungen von 3 bis 5 Sekunden als realistisch anzusetzen.

SCHRIFTTUM

- /1/ Dr. L. Ahorner
Seismologisches Gutachten für das neue Kernkraftwerk
Schmehausen bei Hamm
25.08.1974
- /2/ KTA 2201.1
Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Ein-
wirkungen, Teil 1, Grundsätze, Fassung 6/75
- /3/ Dr. L. Ahorner
Bemessungsgrundlagen für die Auslegung gegen seismi-
sche Einwirkungen im Standortbereich Schmehausen
29.05.1979
- /4/ Dr. L. Ahorner, W. Rosenhauer
Probability Distribution of Earthquake Accelerations
with Application to Sites in the Northern Rhine Area
Central Europe, J. Geophys. 41, 501-594, 1975
- /5/ Murphy, O'Brien
The Correlation of Peak Ground Acceleration Amplitude
with Seismic Intensity and Other Physical Parameters,
BSSA 67 No. 3, June 1977

A. 3 BEANSPRUCHUNG VON REAKTORSCHUTZGEBÄUDE,
SPANNBETONBEHÄLTER UND KOMPONENTEN
INFOLGE ERDBEBEN

J. Altes, D. Koschmieder, KFA-ISF

INHALT	Seite
1. Einleitung	1
2. Finite-Element-Modelle	1
3. Materialkennwerte	2
4. Erdbebenerregung	3
5. Finite-Element-Programm	3
6. Eigenfrequenzen und Eigenformen	4
7. Verschiebungen	5
8. Beschleunigungen	6
9. Momente und Kräfte für das RSG	6
10. Beanspruchungen des Spannbetonbehälters	8
Schrifttum	9
Abbildungen	10

1. Einleitung

Die Beanspruchungen der bautechnischen und maschinenbautechnischen Komponenten wurden in Form von Etagenantwortspektren und Verschiebungs- bzw. Beschleunigungs-Zeitverläufen sowie Momenten und Kräften für eine gemessene und eine künstlich erzeugte Erdbebenerregung ermittelt. Dabei sind die Materialdaten des Baugrundes variiert worden, um ein breites Spektrum möglicher Untergrundverhältnisse abzudecken.

Das Verhalten des SBB ist in einem detaillierten Modell gesondert analysiert worden.

Die Ergebnisse sind Voraussetzung für die Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit von wichtigen Komponenten und Bauteilen, die in den Kapiteln A.4 und A.5 dieses Fachbandes behandelt werden.

2. Finite-Element-Modelle

Dem nicht sehr detaillierten Charakter der Rechnungen zur Versagenswahrscheinlichkeit entsprechend wurde ein Balkenmodell mit wenigen Freiheitsgraden (Anzahl der Unbekannten = 108) gewählt, das jedoch das Schwingungsverhalten des gesamten Gebäudes ausreichend genau wiedergibt /1/ (Abb. 1). Das Reaktorschutzgebäude (RSG) (Element 4-13) und der Spannbetonbehälter (SBB) (Element 14-17) sind über die Fundamentplatte (Element 3) mit dem Baugrund (Element 1 und 2) gekoppelt. Für das Modell wurden Balkenelemente (BECOS) gewählt, die an jedem Knotenpunkt 6 Freiheitsgrade (3 Translationen und 3 Rotationen) besitzen.

Die geometrischen Modelldaten sind /2/ entnommen.

Durch eine zusätzliche Untersuchung wurde mit einem detaillierten dreidimensionalen Modell (Anzahl der Unbekannten = 3252, Abb. 2) der Einfluß untersucht, den die konstruktive Gestaltung des Anschlusses des SBB-Tragsterns an die Bodenplatte verursacht, wodurch ggf. unter Erdbebeneinwirkung eine klaffende Fuge (Abheben in vertikaler Richtung) entstehen kann. Nach /3/ braucht horizontales Gleiten in dieser Schicht nicht unterstellt zu werden, da die vorhandenen Verankerungselemente dies verhindern.

3. Materialkennwerte

Für den bewehrten Beton ist ein dynamischer Schermodul von $3 \cdot 10^4 \text{ MN/m}^2$ und eine Poissonzahl von $\mu = 0,2$ eingesetzt worden. Die modale Dämpfung wurde gemäß Reg-Guide 1.61 /4/ zu 5% gewählt. Dieser Wert ist für das 2-fache Sicherheitserdbeben (0,2 g), für das die Versagenswahrscheinlichkeiten ermittelt werden sollen, angemessen. Eine vom Beanspruchungsniveau abhängige Dämpfung konnte aus Zeit- und Kostengründen nicht eingeführt werden.

Die dynamischen Bodenkennwerte für den Standort Schmehausen wurden /5/ entnommen. Zur Erfassung der natürlich vorhandenen Schwankungsbreiten der Bodenkennwerte sind Rechnungen für den mittleren Schermodul von 355 MN/m^2 sowie für die untere und obere Grenze von 280 und 430 MN/m^2 durchgeführt worden. Die modale Dämpfung für den Boden wurde auf der konservativen Seite liegend einheitlich mit 5% angesetzt. Am Standort Schmehausen ist relativ fester Untergrund (Mergel) vorhanden.

Um die gesamten Untersuchungen auf eine breitere Basis stellen zu können und standortunabhängiger zu machen, sind auch weichere Böden, wie sie zumeist an Flußstandorten vorhanden sind, einbezogen worden. Stellvertretend wurden die Verhältnisse von Biblis ausgewählt und ebenfalls /5/ entnommen. Für den Schermodul wurde hier eine Schwan-
kungsbreite von $\pm 40\%$ angenommen. Als modale Dämpfung wurde in diesem Fall für die erste Eigenform 8% angesetzt, die übrigen Eigenformen sind mit 5% gedämpft. Die 1. (x-z Ebene) und 2. (y-z Ebene) Eigenform sind identisch, wie bei allen Biegeformen. Sie sind nur

um 90% gedreht. Bei in beiden horizontalen Richtungen gleicher Anregung, wie sie beim künstlichen Erdbeben vorhanden ist, kann daher der Einfluß der Dämpfung auf das Antwortverhalten analysiert werden.

4. Erdbebenerregung

Die Untersuchungen sind aufgrund des Gutachtens Ahorner für zwei verschiedene Erdbeben (je zwei horizontal - und eine vertikale Komponente) durchgeführt worden, ein gemessenes und ein künstlich erzeugtes. Alle Zeitverläufe wurden baseline korrigiert /6/.

Auf deutsche Verhältnisse ist das San Francisco-Erdbeben vom 22.03.1957, Meßpunkt: Golden Gate Park gut übertragbar. Die Beschleunigungen wurden auf einen Maximalwert von 0,1 g normiert (Abb. 3-8). Die Übertragung der Ergebnisse auf andere g-Niveaus, erfolgt durch Multiplikation bzw. Division (bei 0,2 g: Faktor 2). Die zugehörigen Spektren sind den Abb. 9-11 zu entnehmen, in denen zum Vergleich die für den Standort Schmehausen geltenden Standardantwortspektren gestrichelt eingetragen worden sind. Im Modell wurde die Komponente S80E in x-, die Komponenten N10E in y- und die Komponenten VERT in z-Richtung angebracht.

Ein künstliches Erdbeben wurde mit Hilfe des Programms SIMEAR /7/ erzeugt, das das vorgegebene Designspektrum umschreibt (Abb. 12 Horizontalkomponente, Abb. 13 Vertikalkomponente). Die Dauer der Strong Motion Phase wurde dabei zu 7 s angenommen, was für den Standort Schmehausen pessimistisch ist. Das Standardantwortspektrum für die vertikale Richtung ergibt sich aus dem für die horizontale durch Multiplikation mit 0,5. Die auf 0,1 g bzw. 0,05 g normierten Zeitverläufe sind Abb. 14-17 zu entnehmen.

5. Finite-Element-Programm

Die dynamischen Berechnungen sind mit dem FE-Programmsystem ASKA, das BREAK und RESTART-Läufe ermöglicht, durchgeführt worden. Die Eigenfrequenzen sind mit der allgemeinen Householder Methode bestimmt worden. Berücksichtigt wurden Frequenzen bis ungefähr 60 Hz.

In der folgenden Tabelle sind die Rechnungen zusammengestellt.

Schermodul MN/m ²	Dämpfung %	Poissonzahl -	Erdbeben
355 280 430	} 5%	} 0,4	San Francisco Erdbeben
155 93 217	} 1.Mode 8% 2.-21.Mode 5%	} 0,47	
355 280 430	wie oben	wie oben	künstliches Erdbeben
155 93 217	wie oben	wie oben	

In diesem Bericht werden als Beispiele nur einzelne charakteristische Ergebnisse mitgeteilt.

6. Eigenfrequenzen und Eigenformen

Die errechneten Eigenfrequenzen sind in der folgenden Tabelle aufgelistet worden. Sie nehmen erwartungsgemäß mit zunehmender Baugrundsteifigkeit zu.

Die Eigenformen, von denen die Kipp- und Biegeschwingungen als Plots beigefügt werden (Abb. 18), unterscheiden sich bei unterschiedlichem Schermodul in der charakteristischen Form nicht voneinander.

Eigenfrequenzen [Hz]

Eigenform	Schermodul MN/m ²					
	93	155	217	280	355	430
1 K	0,77	0,99	1,16	1,31	1,47	1,60
2	0,77	0,99	1,16	1,32	1,47	1,60
3 T	1,36	1,75	2,06	2,38	2,67	2,91
4 V	1,97	2,53	2,98	3,37	3,77	4,13
5	6,06 ^T	7,20 ^B	7,26	7,30	7,33	7,35
6	7,04 ^B	7,21 ^B	7,27	7,31	7,34	7,36
7	7,05 ^B	7,57 ^T	8,55	8,98	9,07	9,11
8 T	9,21	9,26	9,43	10,0	10,7	11,2
9 V	11,2	12,9	13,3	13,4	13,5	13,6
10	12,4 ^B	14,7	15,4 ^T	16,1	16,8	17,6
11	12,4 ^B	14,7	16,2 ^B	17,2	18,0	18,6
12	14,2 ^V	14,9 ^T	16,2 ^B	17,3	18,1	18,7
13	14,6 ^T	15,8 ^V	17,9	19,8	21,7	23,2
14	26,4 ^B	27,5 ^T	27,6	27,7	27,8	28,0
15	27,4 ^T	27,9 ^B	29,4 ^B	31,0 ^B	32,6 ^B	33,5 ^V
16	27,8 ^B	29,2 ^B	30,6 ^B	32,0 ^B	33,0 ^V	34,2 ^B
17	31,6 ^V	31,9 ^V	32,2 ^V	32,5 ^V	33,6 ^B	35,0 ^B
18 T	40,6	40,6	40,6	40,6	40,6	40,6
19 V	40,7	41,0	41,2	41,5	42,0	42,5
20 T	45,9	45,9	45,9	45,9	46,0	46,0
21 B	54,8	56,0	56,8	57,7	58,7	59,7

K = Kippschwingung

T = Torsionsschwingung

V = Vertikalschwingung

B = Biegung

7. Verschiebungen

Für jeden Knotenpunkt sind die Verschiebungs-Zeitverläufe in x, y und z-Richtung berechnet worden. Als Beispiele werden sie hier für das RSG in je einem Bild für weichen und harten Untergrund sowie beide Erregungsfunktionen dargestellt (Abb. 19-24). In den Ver-

läufen ist klar die Grundfrequenz des Gebäudes einschließlich ihrer Änderungen zu erkennen (siehe z.B. Abb. 20). Je steifer der Boden wird, desto stärker schlägt der Charakter der Erregungsfunktion durch (vergl. z.B. Abb. 15 und 23). Die maximalen Verschiebungen nehmen mit ansteigendem Schermodul ab.

Mit der Höhe des RSG nimmt die horizontale Verschiebung zu (z.B. Abb. 19 und 20), während in vertikaler Richtung keine unterschiedliche Relativbewegung festzustellen ist (Abb. 21).

8. Beschleunigungen

Für jeden Punkt sind in den drei Richtungen ebenfalls die Beschleunigungs-Zeitverläufe (z.B. Abb. 25) und daraus die Spektren (Abb. 26-35) ermittelt worden.

Deutlich erkennbar ist die Zunahme der Beanspruchung mit ansteigendem Schermodul (siehe z.B. Abb. 27 und 30). Wie zu erwarten, ergibt das künstliche Erdbeben gegenüber den gemessenen die höheren Beschleunigungen, vor allem bei den härteren Böden (z.B. Abb. 29 und 35). Die Frequenzverschiebung spiegelt sich in den Spektren ebenfalls wieder (z.B. 28 und 31). Es sei noch darauf hingewiesen, daß beim künstlichen Erdbeben der Einfluß der unterschiedlichen Dämpfung des 1. Modes (in x-Richtung: 8%; in y-Richtung 5%) in den Spektren abgelesen werden kann (z.B. Abb. 32 und 33). Er tritt bei größerem Schermodul stärker in Erscheinung.

9. Momente und Kräfte für das RSG

Die Maximalwerte der Momente und Kräfte können für den ungünstigsten Punkt (Knotenpunkt 4, Übergang von Fundamentplatte zur Zylinderschale des RSG) der folgenden Tabelle entnommen werden. Die größten Werte ergeben sich für das künstliche Erdbeben und harten Untergrund, die kleinsten Werte für das gemessene Erdbeben und weichen Untergrund.

Scher- modul [MN/m ²]	Erd- beben	Normalkraft N [N]	Scherkraft Sx Sy [N]	Biegemoment Mx My [Nm]	Torsions- moment T [Nm]
93	San Fran- cisco	0.1015+08	0.7185+07 -0.8906+07	0.5095+09 -0.2656+09	-0.4155+05
430	künst- lich	-0.1201+08	0.4035+08 0.4208+08	-0.1915+10 -0.1871+10	0.1284+06

Für die Schleuse (Punkt 8 bis 10) und den Kran (Punkt 11) betragen die maximalen Beanspruchungen:

Punkt	N	Sx, Sy	Mx, My	T
8	0.8655+07	-0.3756+08 -0.3673+08	0.9403+09 0.9893+09	-0.3411+05
9	0.6373+07	-0.3307+08 -0.3170+08	0.6673+09 0.7101+09	-0.2788+05
10	0.4302+07	-0.2698+08 -0.2554+08	0.3942+09 0.4249+09	-0.2116+05
11	0.2819+07	-0.2022+08 -0.1863+08	0.1806+09 0.1987+09	-0.1478+05

Die Spektren sind für diese Punkte ebenfalls berechnet worden.

10. Beanspruchungen des Spannbetonbehälters

Die Untersuchungen mit dem detaillierteren dreidimensionalen Modell zur Analyse des Verhaltens des SBB wurden für zwei Grenzfälle durchgeführt:

einmal war der SBB einschließlich Tragstern nur in vertikaler Richtung an 6 Stellen über Spannkabel mit der Fundamentplatte verbunden und zum anderen sowohl horizontal als auch vertikal mit der Fundamentplatte fest verbunden.

Im ersten Fall ergibt sich eine Starrkörperbewegung des SBB nur in vertikaler Richtung mit max 5 mm Verschiebung (Abb. 36 und 37). Eine Bewegung in horizontaler Richtung und Schaukeln tritt nicht auf.

Im zweiten Fall ist während der Strong Motion Phase geringfügiges Schaukeln (etwa 5mm über dem SBB Durchmesser) festzustellen (Abb. 38-41). Die max. Bewegungen betragen in horizontaler Richtung max 12 mm und in vertikaler Richtung wie im ersten Fall 5 mm.

Beim Vergleich der Abb. 37 und 41 wird das unterschiedliche Verhalten des SBB bei den unterschiedlichen Ankopplungsarten deutlich.

Die Bewegungen des RSG unterscheiden sich - wie zu erwarten - bei den beiden Fällen nicht. Die Art der Ankopplung hat keinen Einfluß auf das RSG.

Vergleicht man die Verschiebungs-Zeitverläufe, die sich mit dem Balkenmodell auf festem Untergrund (Abb. 22) ergeben, mit denen des detaillierten Modells (Abb. 42), so stellt man ausreichende Übereinstimmung fest, obwohl beim zweiten Fall die Erdbebenerregung in der Unterkante-Fundamentplatte und nicht wie beim ersten Fall im Boden angebracht wurde.

Schrifttum

- /1/ H. Steinhilber
Das Schwingungsverhalten von Reaktorgebäude, Druckbehälter und Rohrleitungen während der Versuche auf niedriger Anregungsstufe, Vergleich von Mess- und Rechenergebnissen.
2. Statusbericht HDR, 24.10.1978, Karlsruhe.

- /2/ W. Zerna - G. Schnellenbach
HTR-Kernkraftwerk. Gutachtliche Stellungnahme zum Einfluß eines Flugzeugabsturzes auf die Beschleunigungsfunktionen ausgewählter Punkte des Reaktorschutzgebäudes. 29.08.1974,

- /3/ W. Zerna - G. Schnellenbach
Studie zur Erarbeitung von Versagensmodellen bautechnischer Komponenten im Rahmen der Probabilistischen Sicherheitsstudie HTR. Kapitel D dieses Fachbandes.

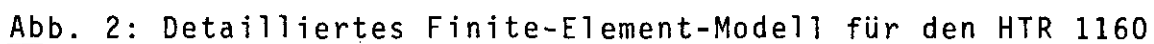
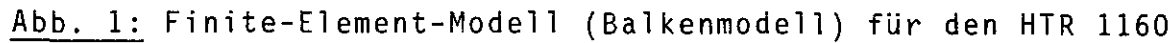
- /4/ USAEC Regulatory Guide 1.61
Damping Values for Seismic Design of Nuclear Power Plants.
Oktober 1973.

- /5/ Schreiben GRS vom 15.03.1979

- /6/ D. Koschmieder, J. Altes
BASLIKO. Ein Programm zur Baseline-Korrektur von Beschleunigungs-Zeitverläufen von Erdbeben.
Jül-Spez-26, Dezember 1978.

- /7/ M. Watabe
SIMEAR. Simulated Earthquake,
National Information Service, University of California.

- /8/ D. Koschmieder, J. Altes
RAPS. Ein dreidimensionales Plotprogramm zum Test und zur Ergebnisdarstellung von Finite-Element Berechnungen.
Jül-1596, 2. Auflage 1980.



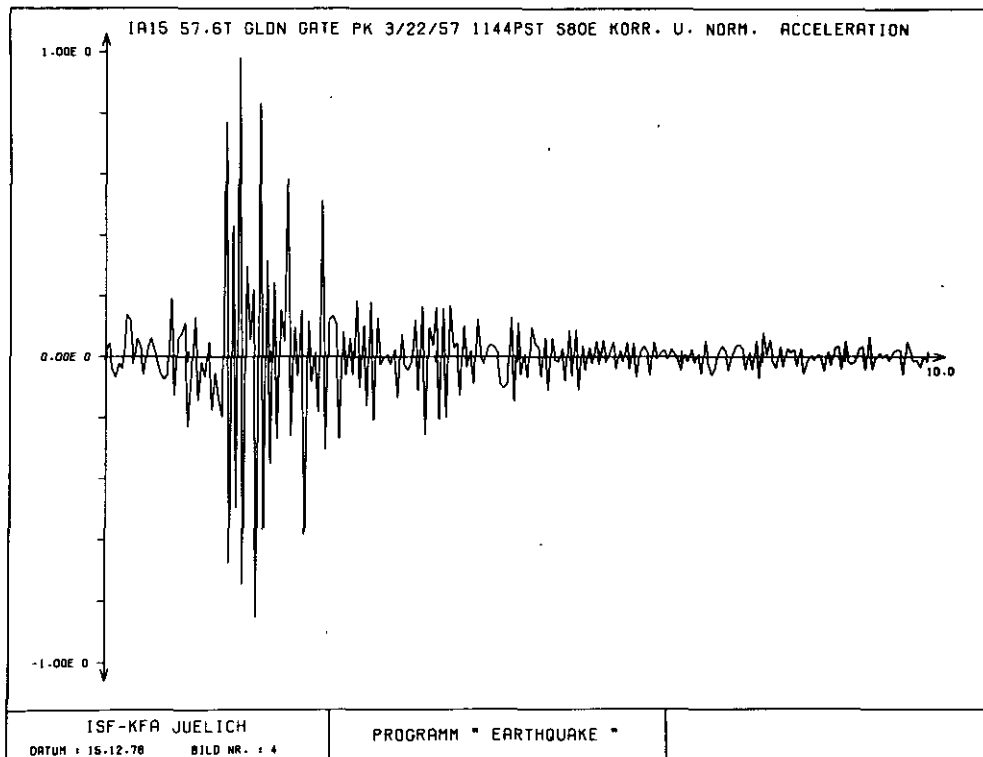


Abb. 3: Beschleunigungszeitverlauf für das Golden Gate Erdbeben (Komponente S80E)

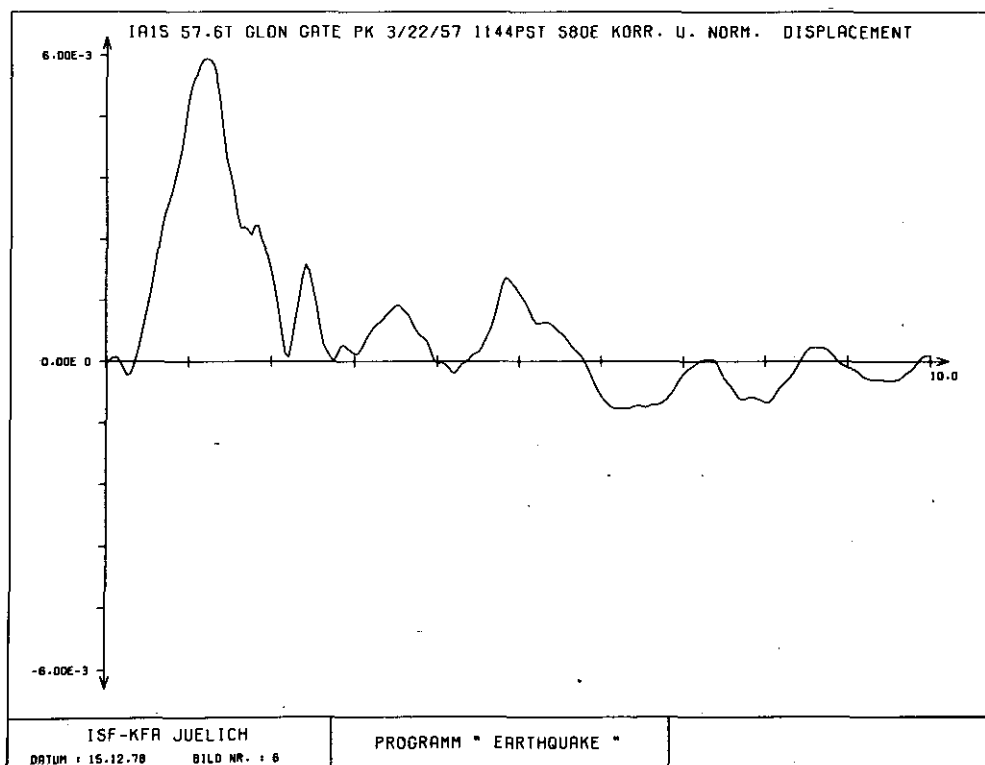


Abb. 4: Verschiebungszeitverlauf für das Golden Gate Erdbeben (Komponente S80E)

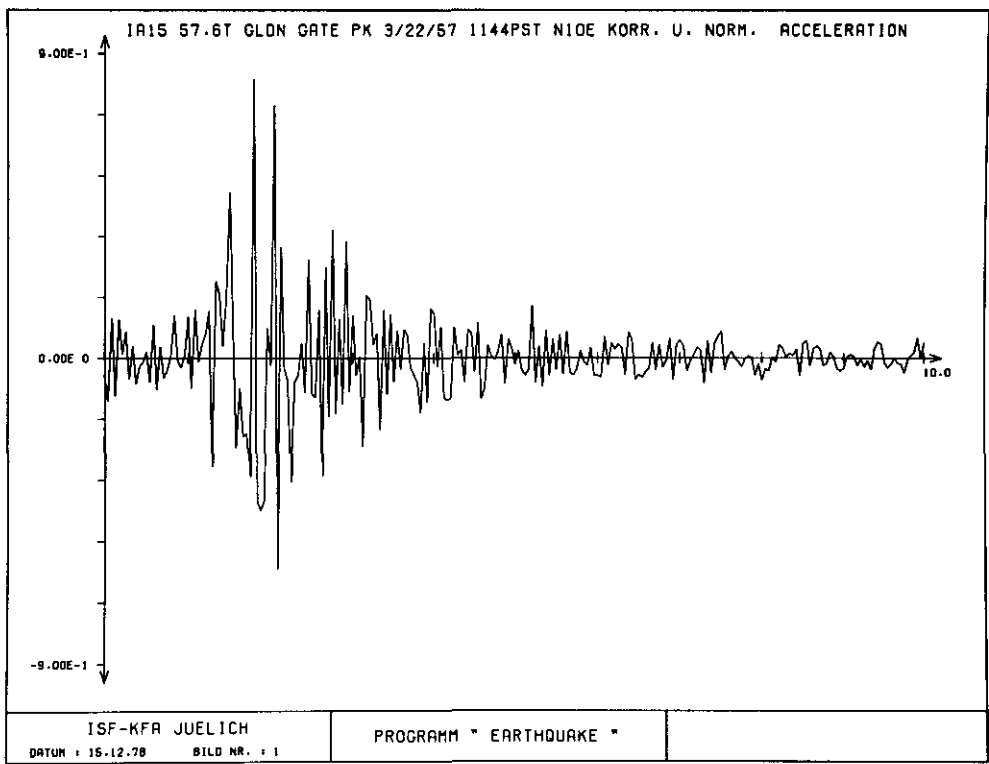


Abb. 5: Beschleunigungszeitverlauf des Golden Gate Erdbebens (Komponente N10E)

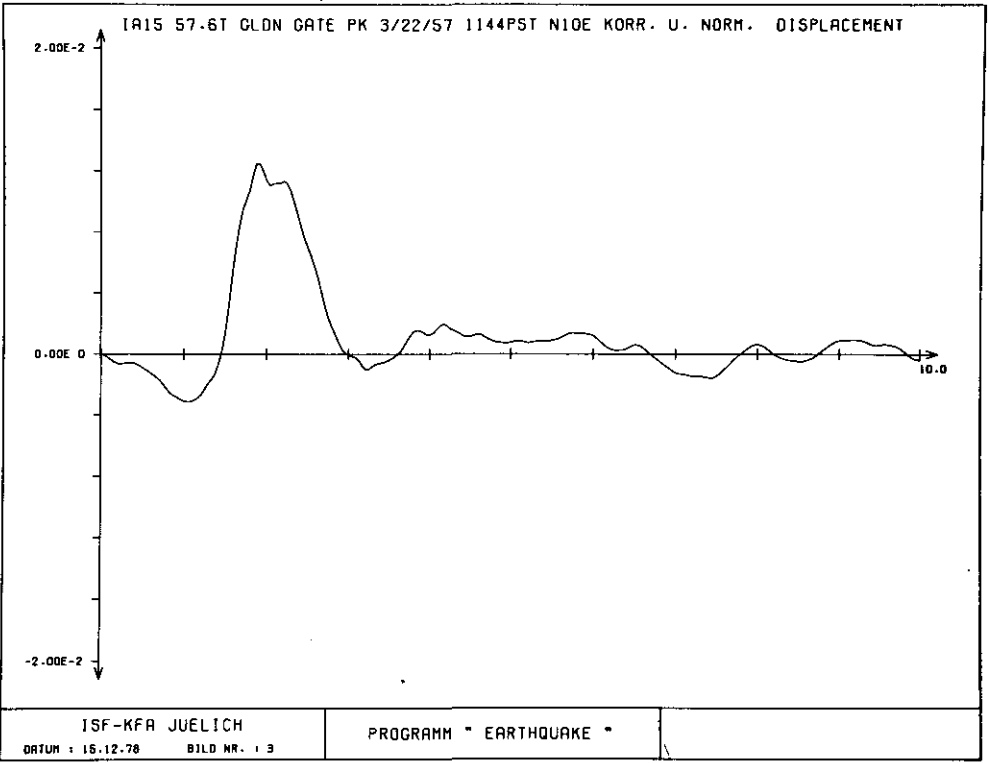


Abb. 6: Verschiebungszeitverlauf des Golden Gate Erdbebens (Komponente N10E)

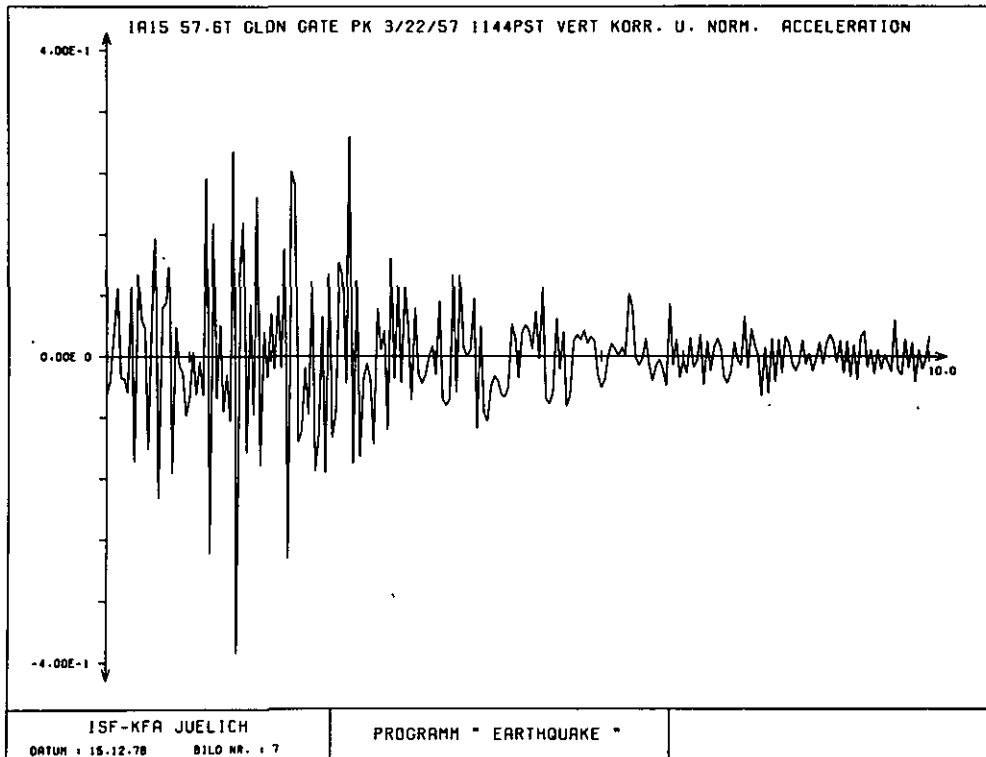


Abb. 7: Beschleunigungszeitverlauf des Golden Gate Erdbebens
(vertikale Komponente)

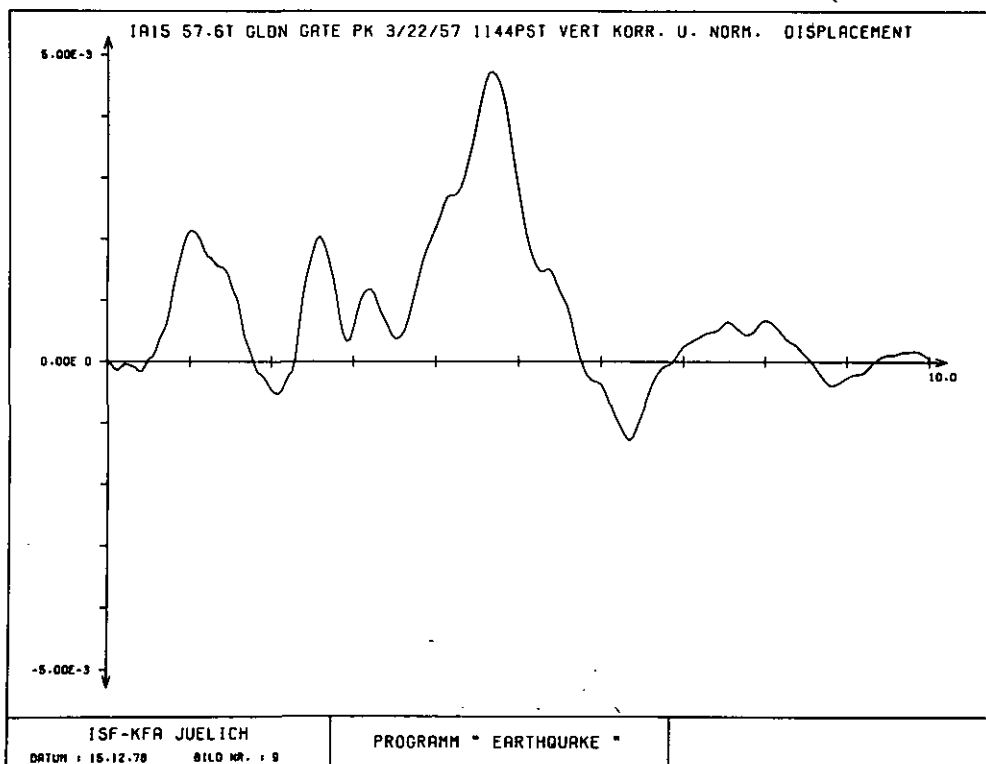


Abb.8: Verschiebungszeitverlauf des Golden Gate Erdbebens
(vertikale Komponente)

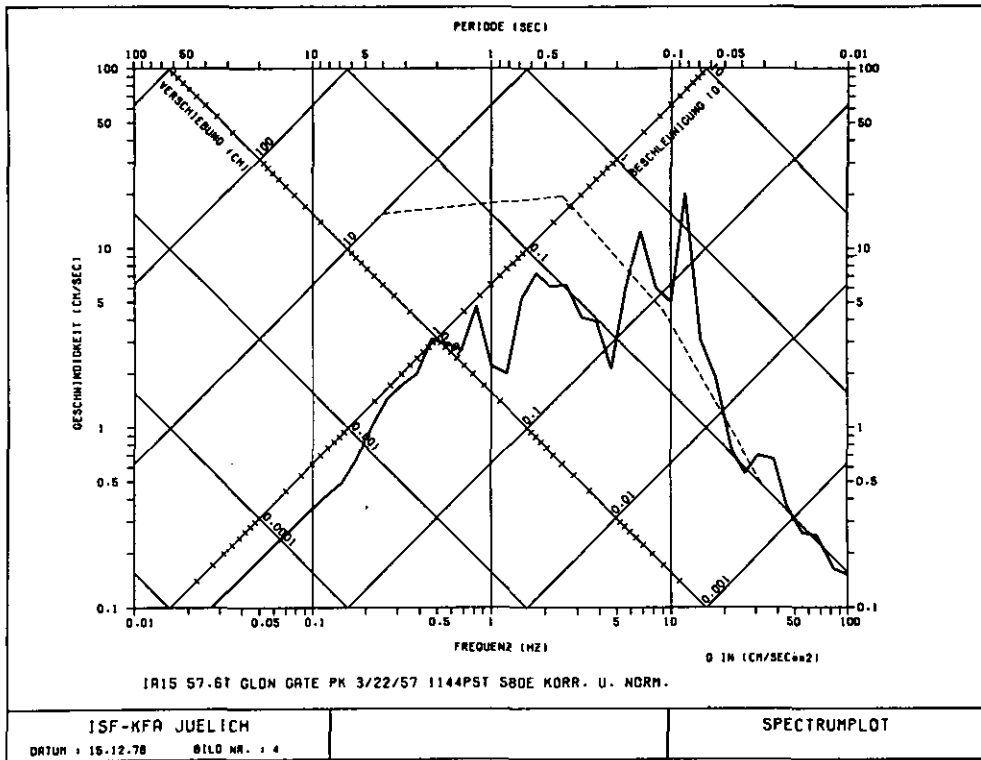


Abb. 9: Response Spectrum des Golden Gate Erdbebens
(Komponente S80E)

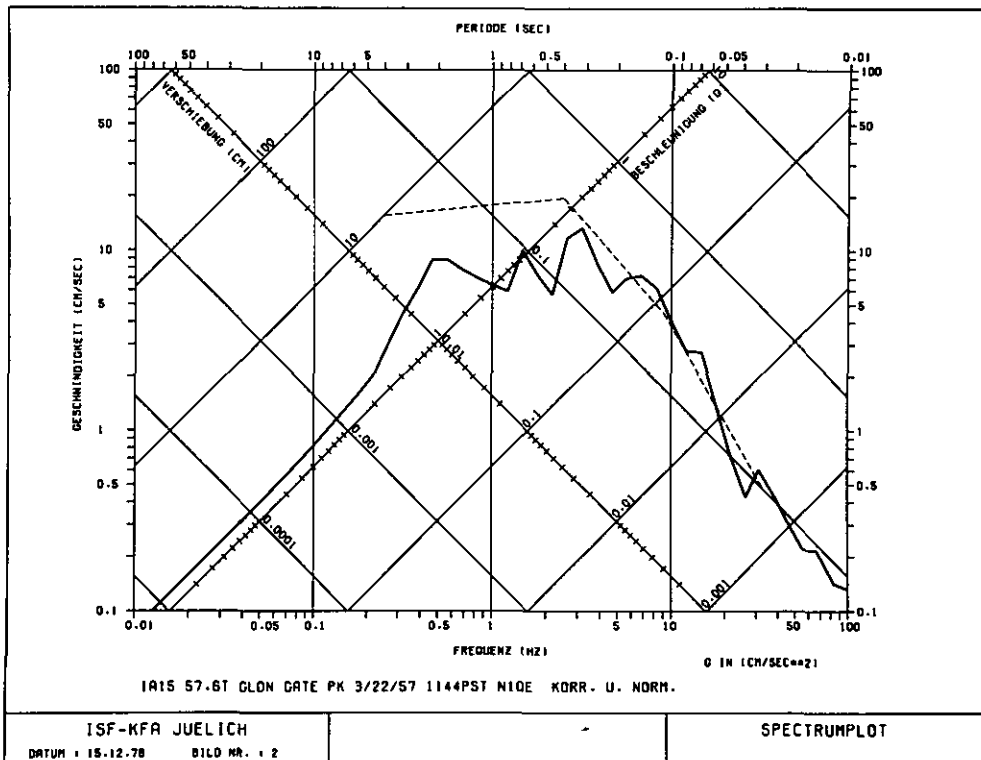


Abb. 10: Response Spectrum des Golden Gate Erdbebens
(Komponente N10E)

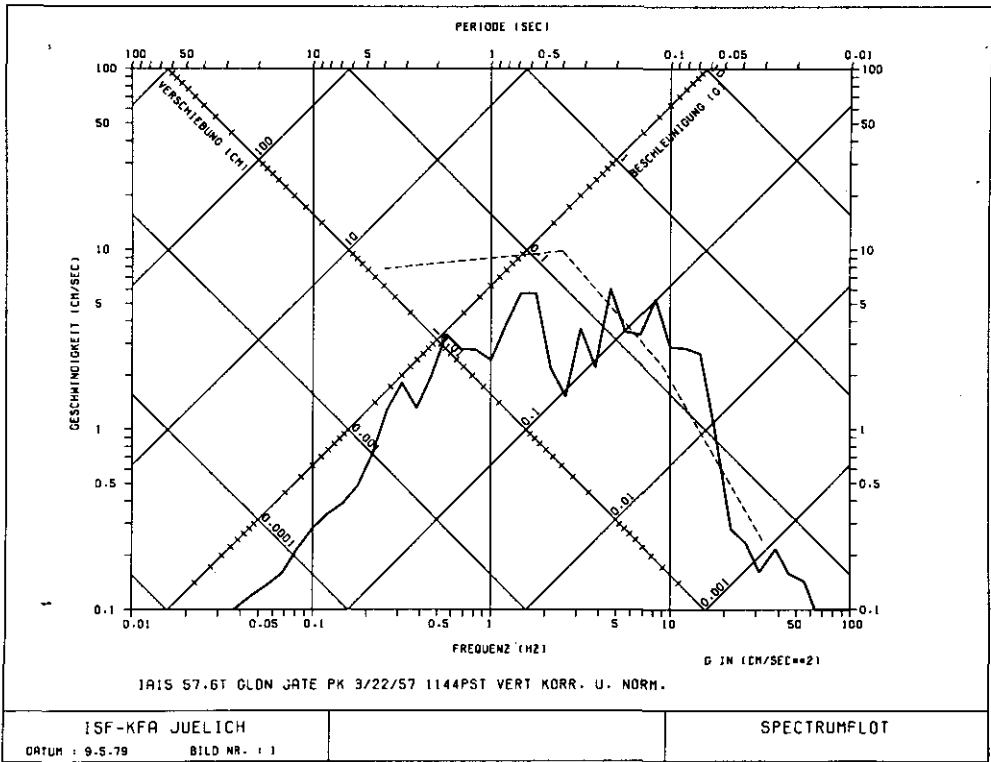


Abb. 11: Response Spectrum des Golden Gate Erdbebens
(vertikale Komponente)

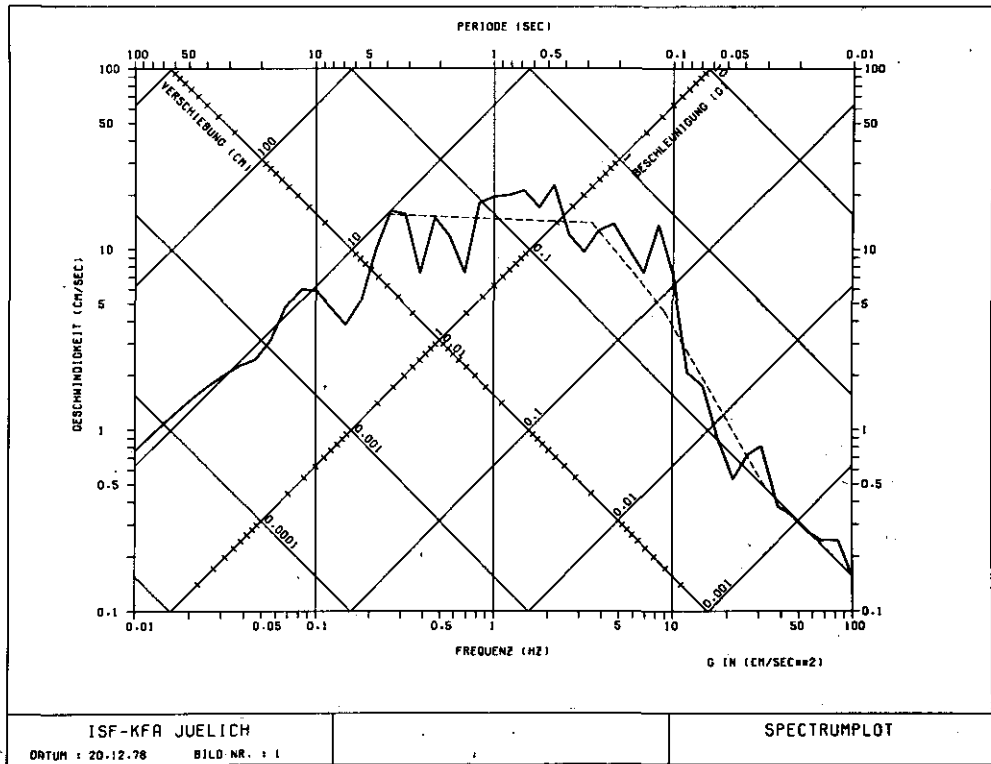


Abb. 12: Response Spectrum des künstlich erzeugten Erdbebens
(horizontale Komponente)

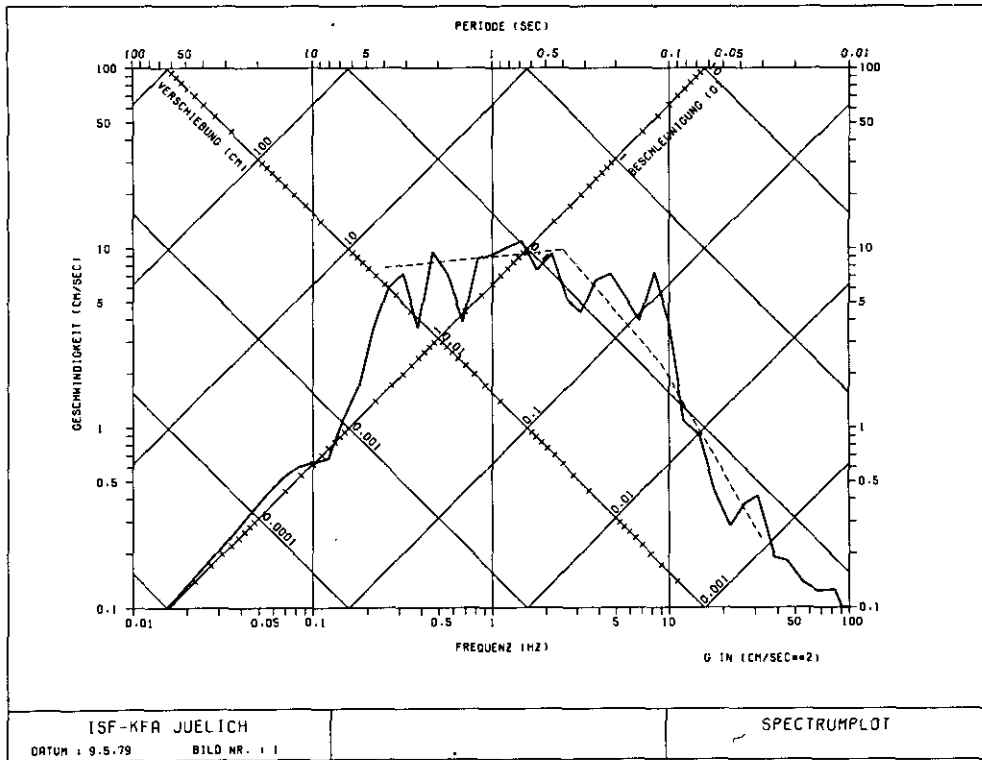


Abb. 13: Response Spectrum des künstlich erzeugten Erdbebens (vertikale Komponente)

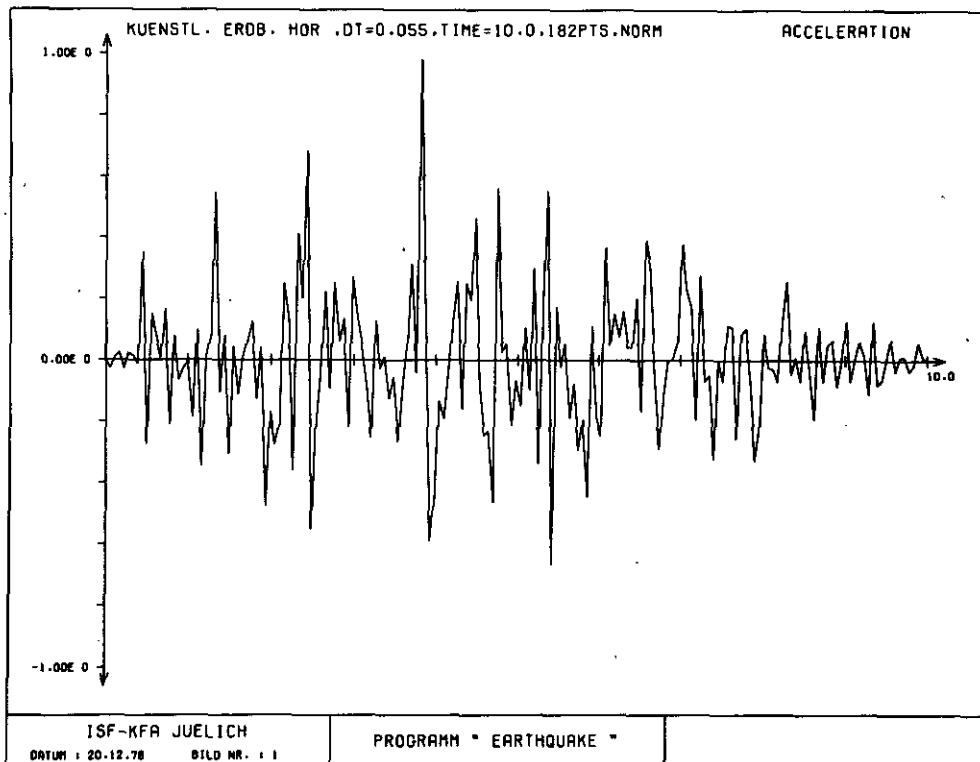


Abb. 14: Beschleunigungszeitverlauf des künstlich erzeugten Erdbebens (horizontale Komponente)

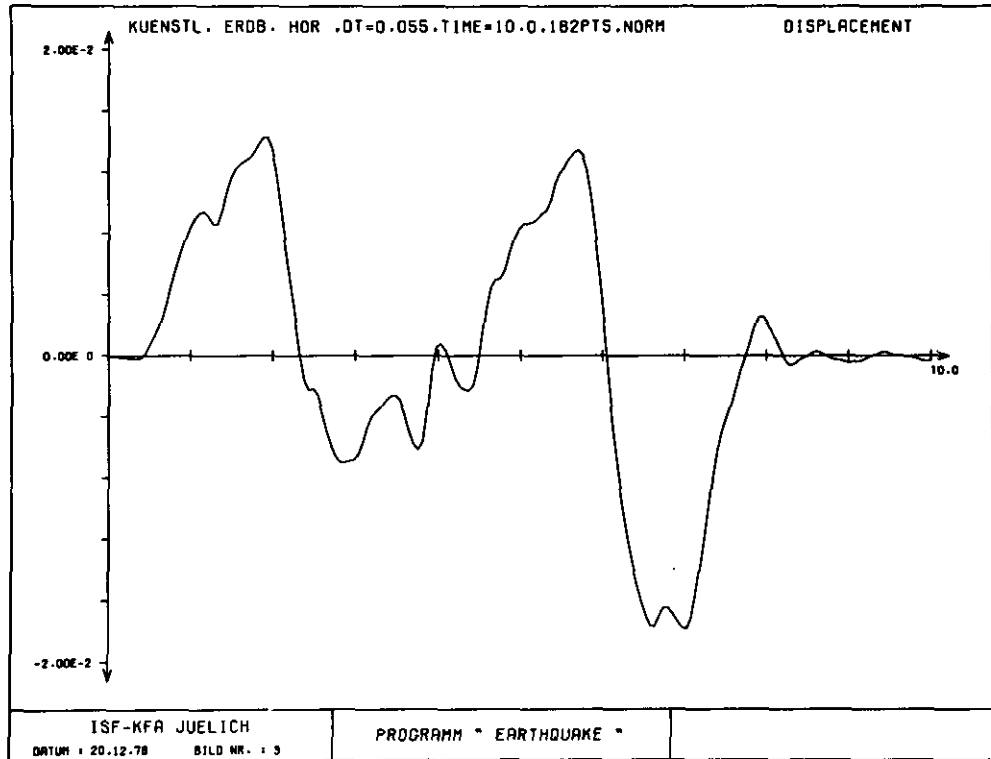


Abb. 15: Verschiebungszeitverlauf des künstlich erzeugten Erdbebens (horizontale Komponente)

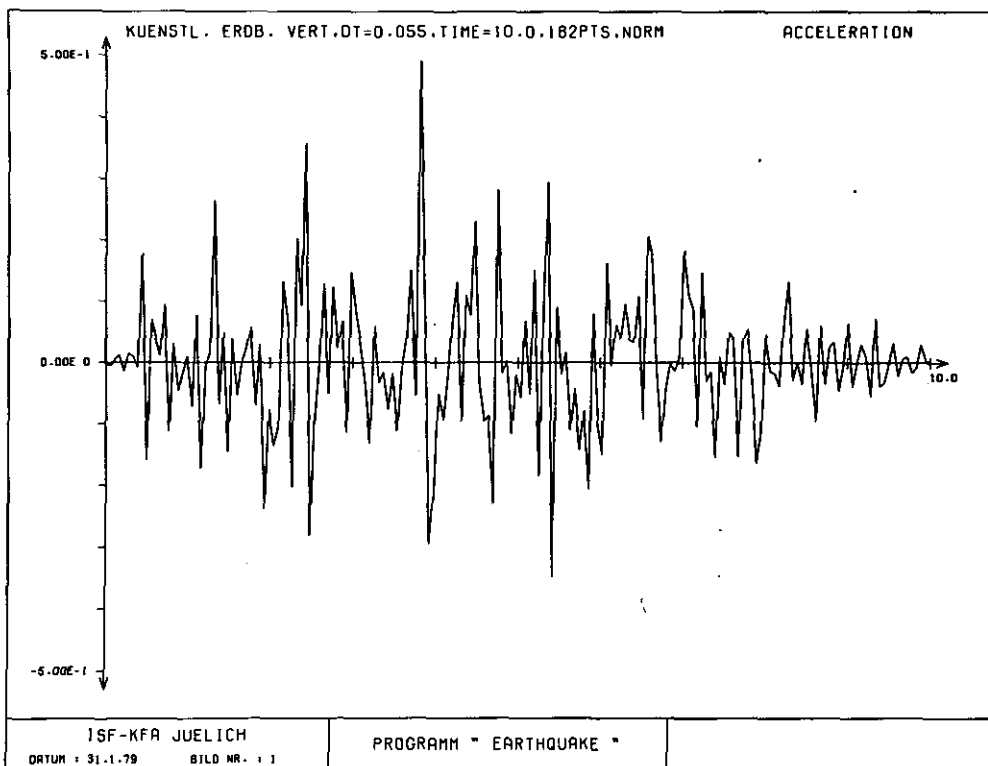


Abb. 16: Beschleunigungszeitverlauf des künstlich erzeugten Erdbebens (vertikale Komponente)

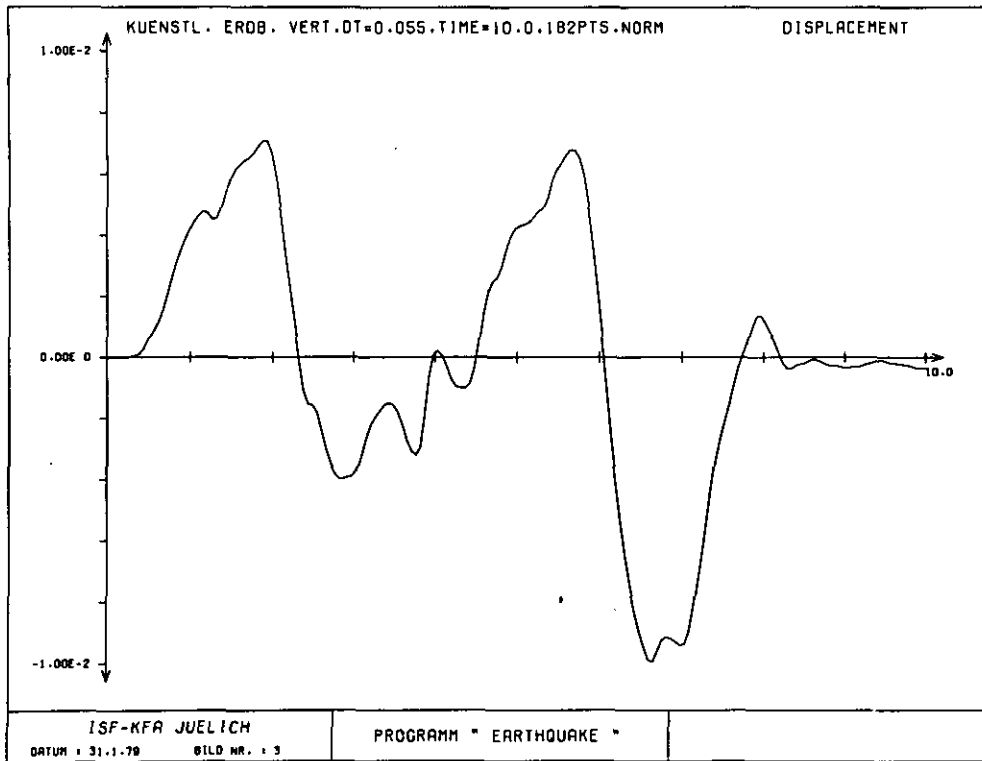


Abb. 17: Verschiebungszeitverlauf des künstlich erzeugten Erdbebens (vertikale Komponente)

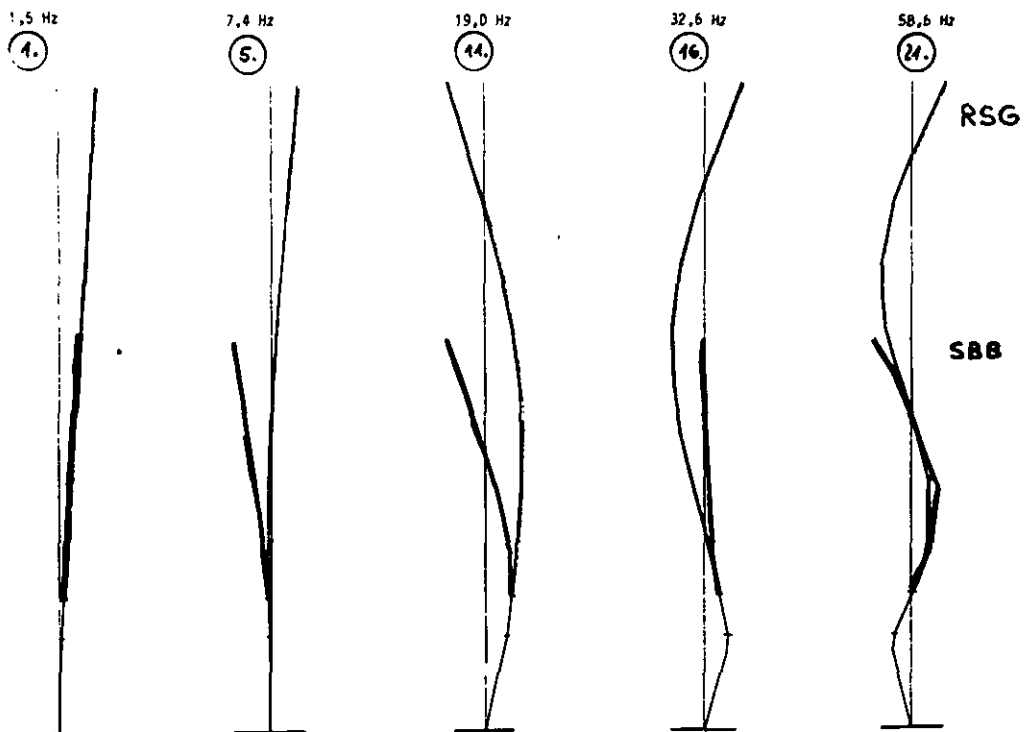


Abb. 18: Eigenformen von RSG und SBB

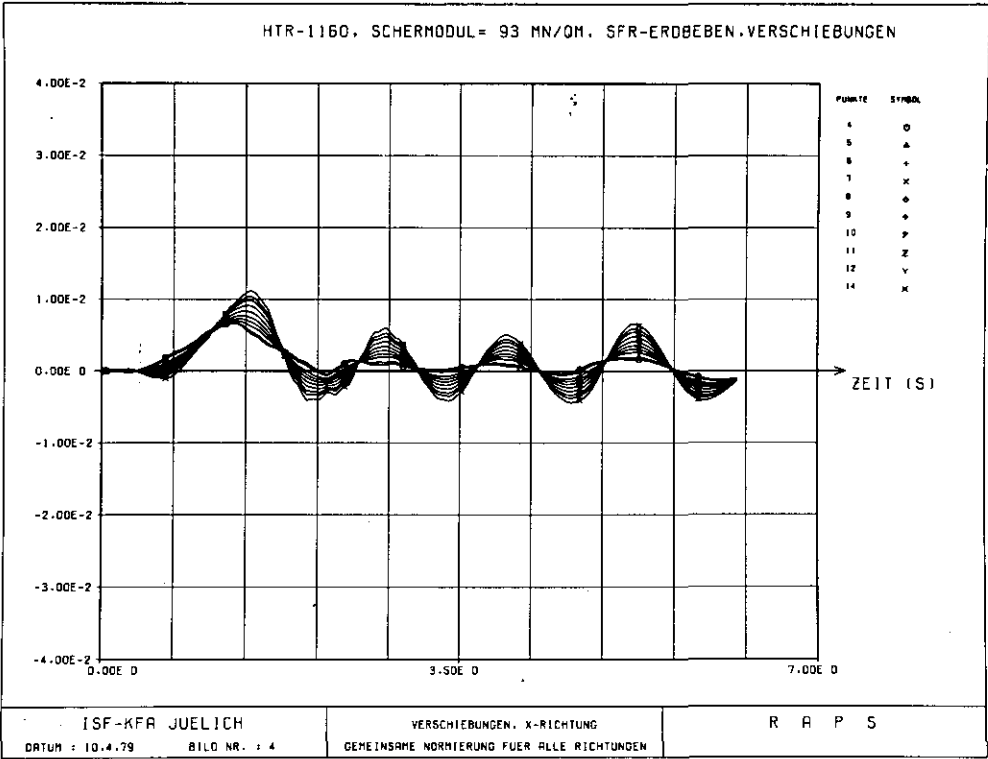


Abb. 19: Antwortverhalten des RSG in x-Richtung bei Erregung durch das Golden Gate Erdbeben (Schermodul 93 MN/m^2)

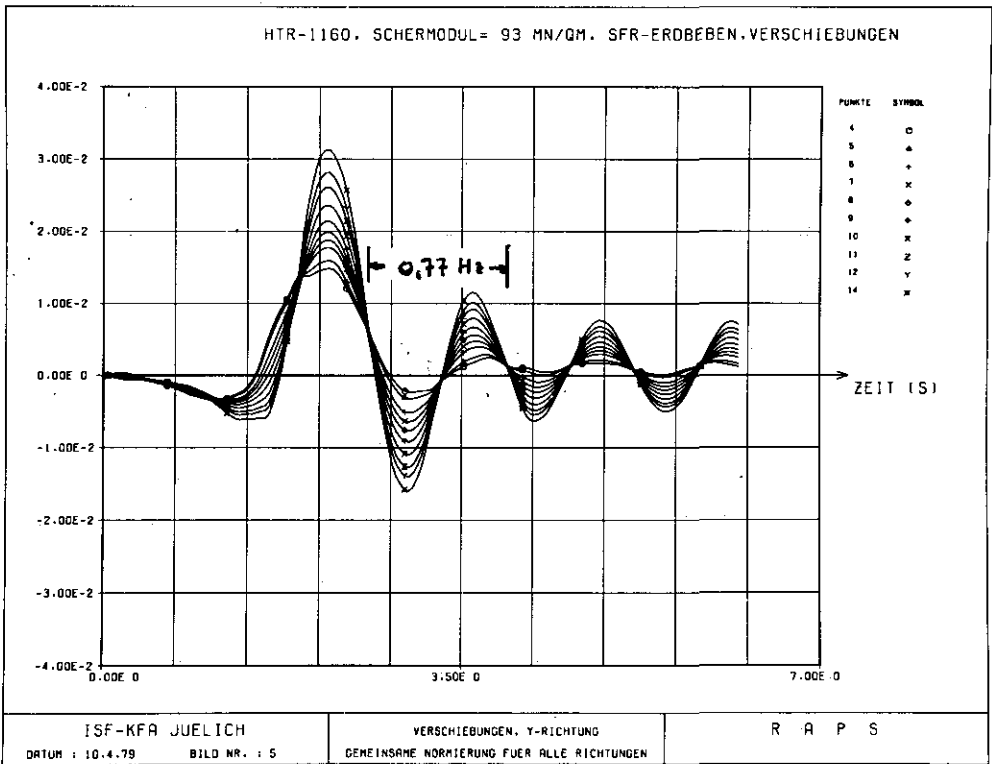


Abb. 20: Antwortverhalten des RSG in y-Richtung bei Erregung durch das Golden Gate Erdbeben (Schermodul 93 MN/m^2)

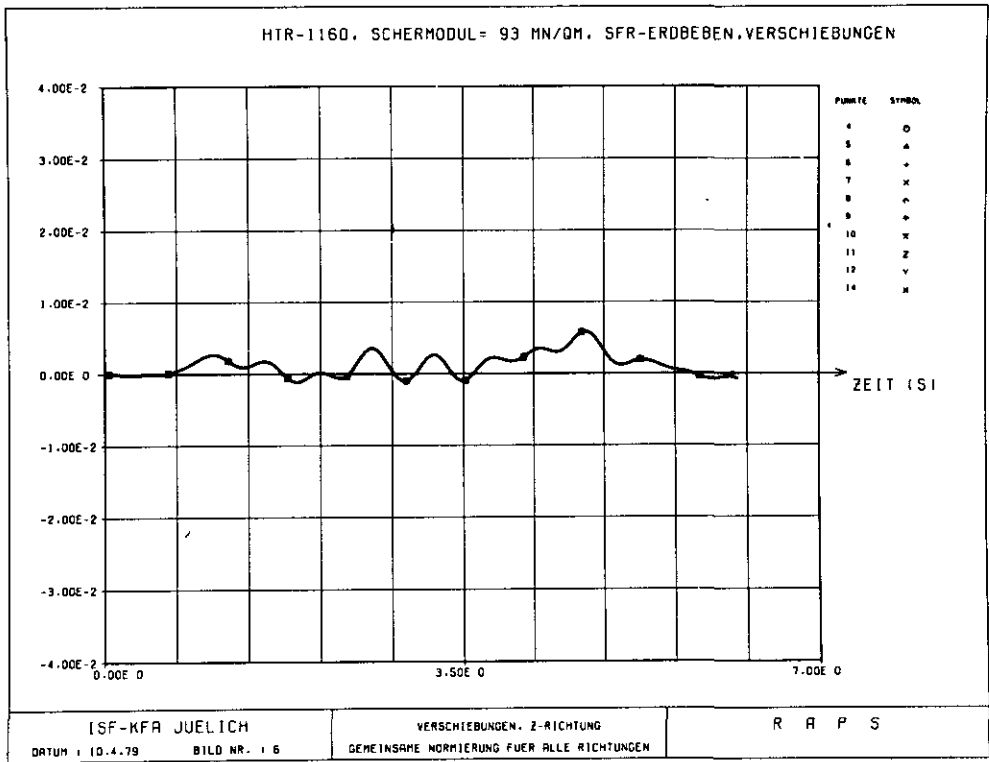


Abb. 21: Antwortverhalten des RSG in z-Richtung bei Erregung durch das Golden Gate Erdbeben (Schermodul 93 MN/m^2)

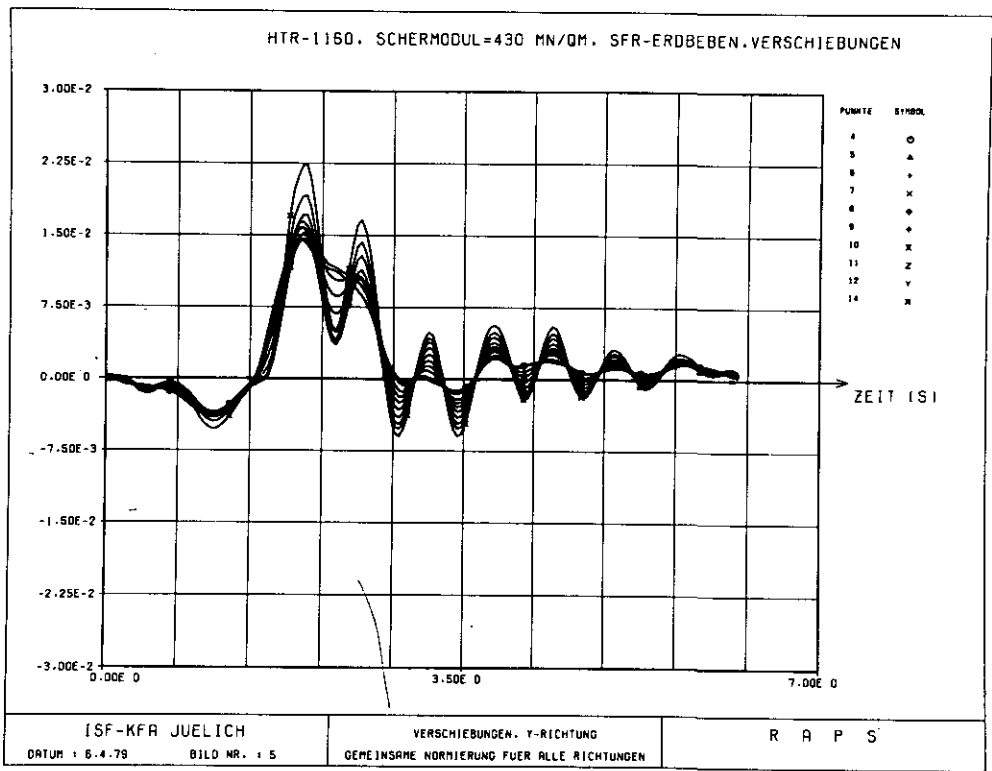


Abb. 22: Antwortverhalten des RSG in y-Richtung bei Erregung durch das Golden Gate Erdbeben (Schermodul 430 MN/m^2)

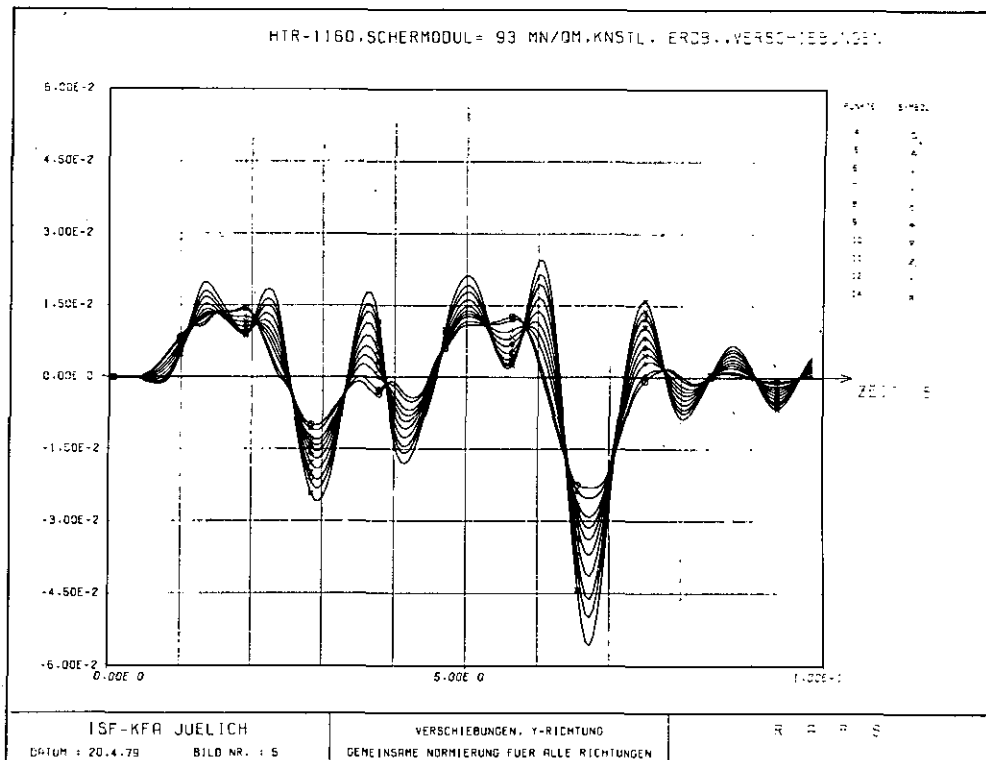


Abb. 23: Antwortverhalten des RSG in y-Richtung bei Erregung durch das künstlich erzeugte Erdbeben (Schermodul 93 MN/m^2)

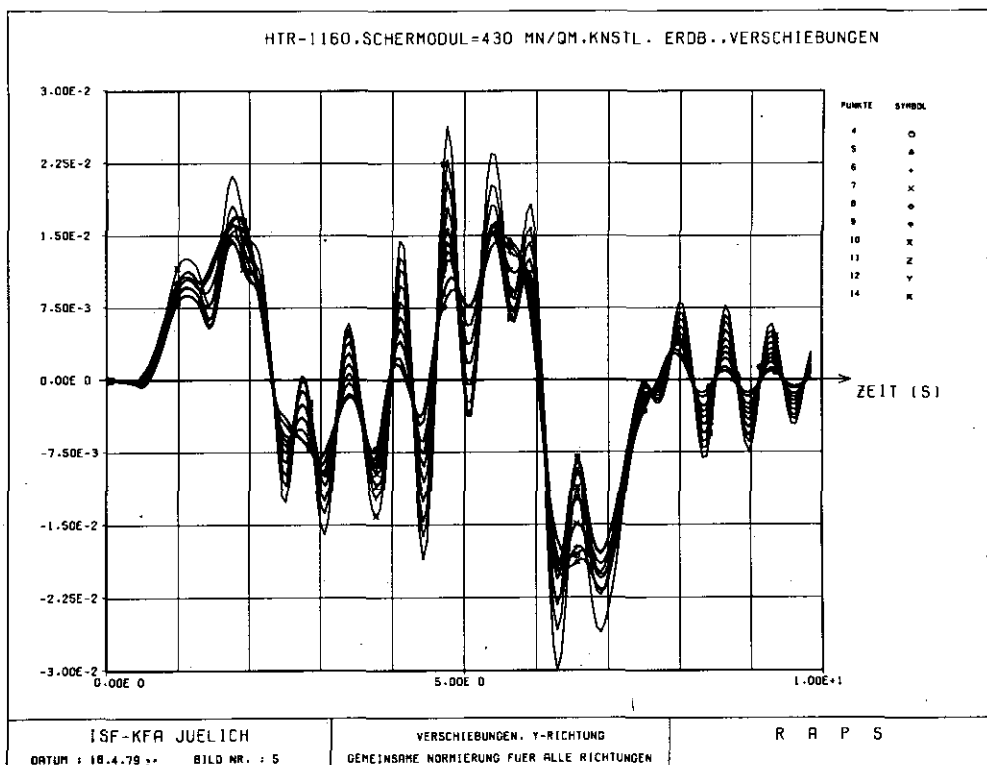


Abb. 24: Antwortverhalten des RSG in y-Richtung bei Erregung durch das künstlich erzeugte Erdbeben (Schermodul 430 MN/m^2)

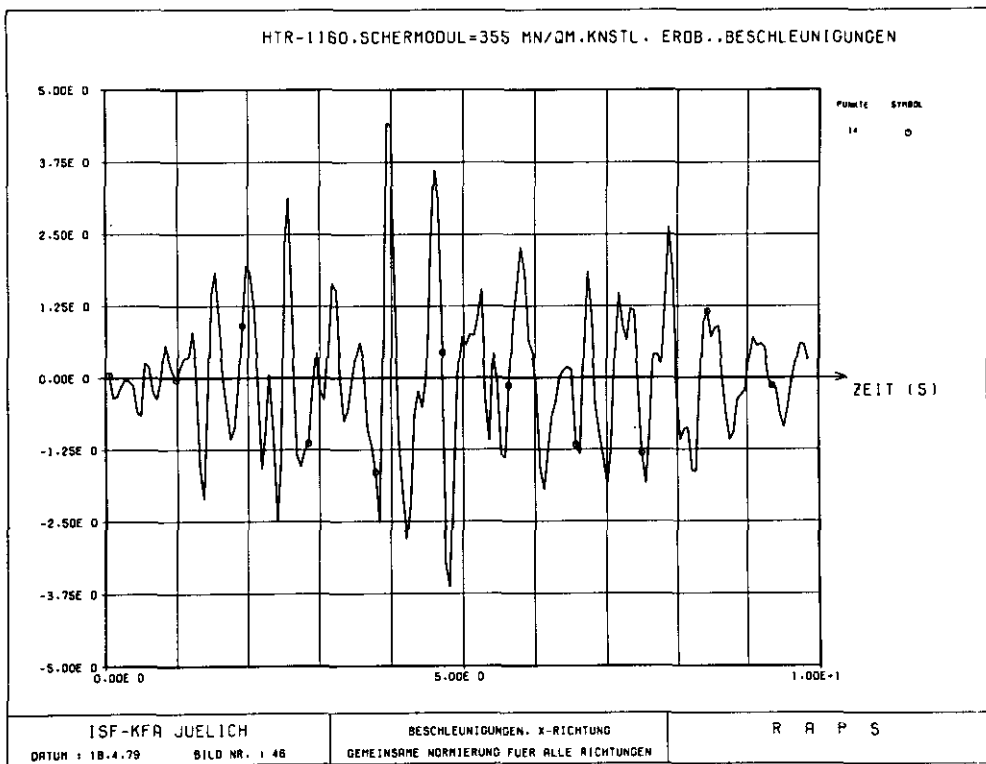


Abb. 25: Antwortverhalten des Punktes 14 des RSG bei Erregung durch das künstliche Erdbeben, Beschleunigungszeitverlauf (Schermodul 355 MN/m^2)

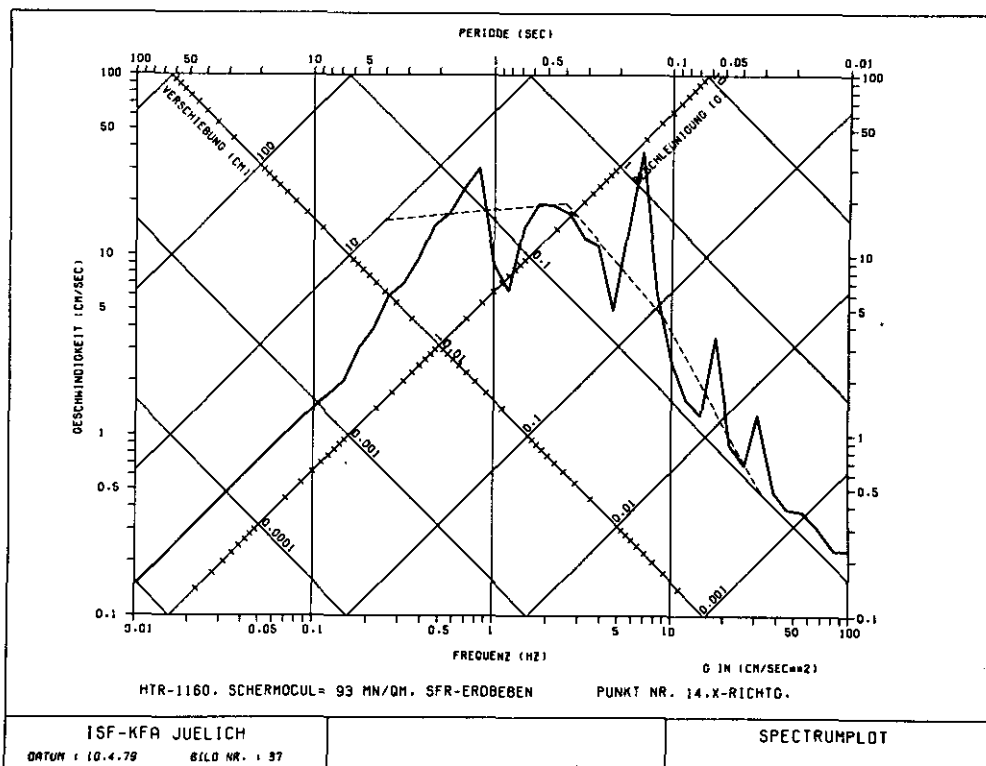


Abb. 26: Etagenantwortspektrum in x-Richtung bei Erregung durch das Golden Gate Erdbeben (Schermodul 93 MN/m^2)

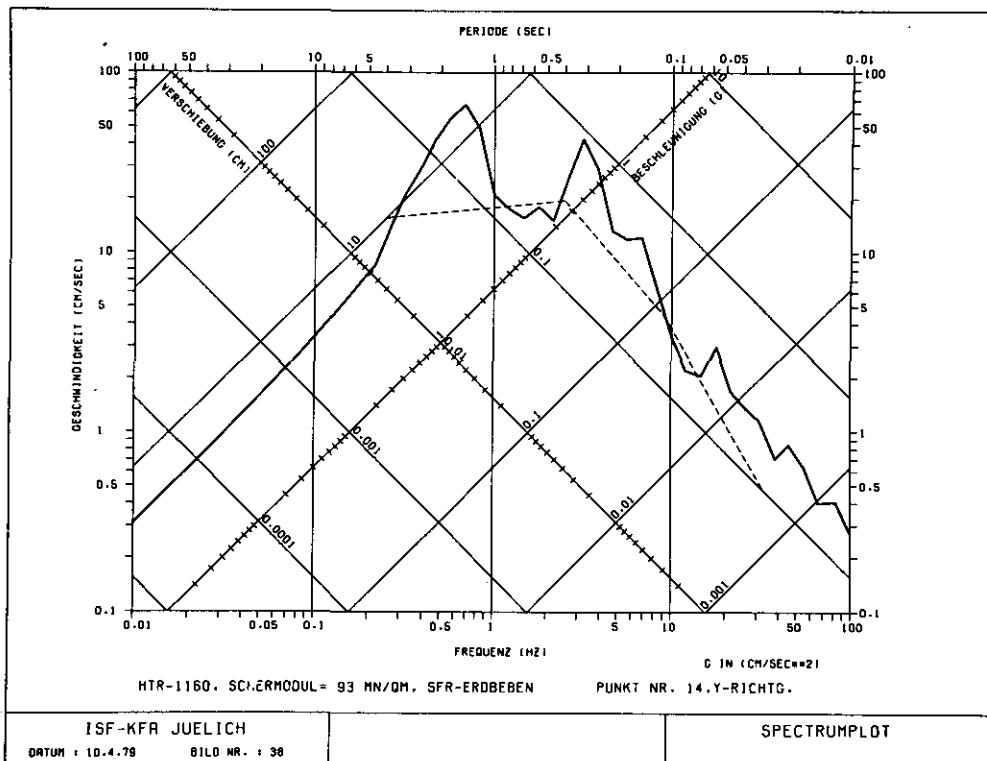


Abb. 27: Etagenantwortspektrum in y-Richtung bei Erregung durch das Golden Gate Erdbeben (Schermodul 93 MN/m^2)

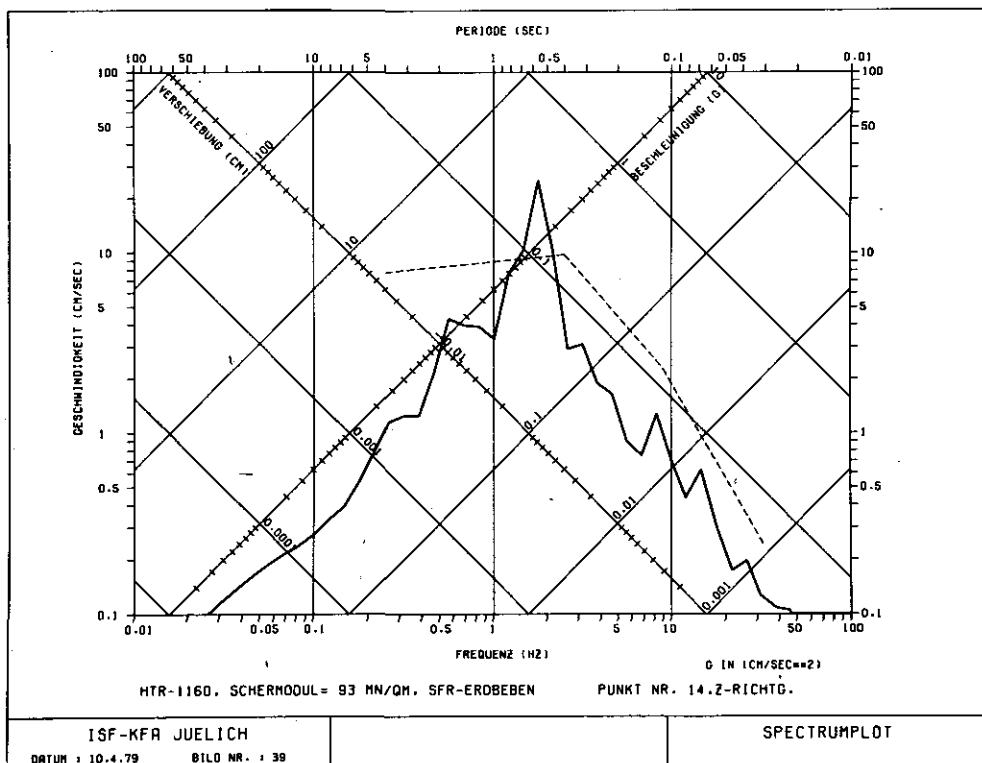


Abb. 28: Etagenantwortspektrum in z-Richtung bei Erregung durch das Golden Gate Erdbeben (Schermodul 93 MN/m^2)

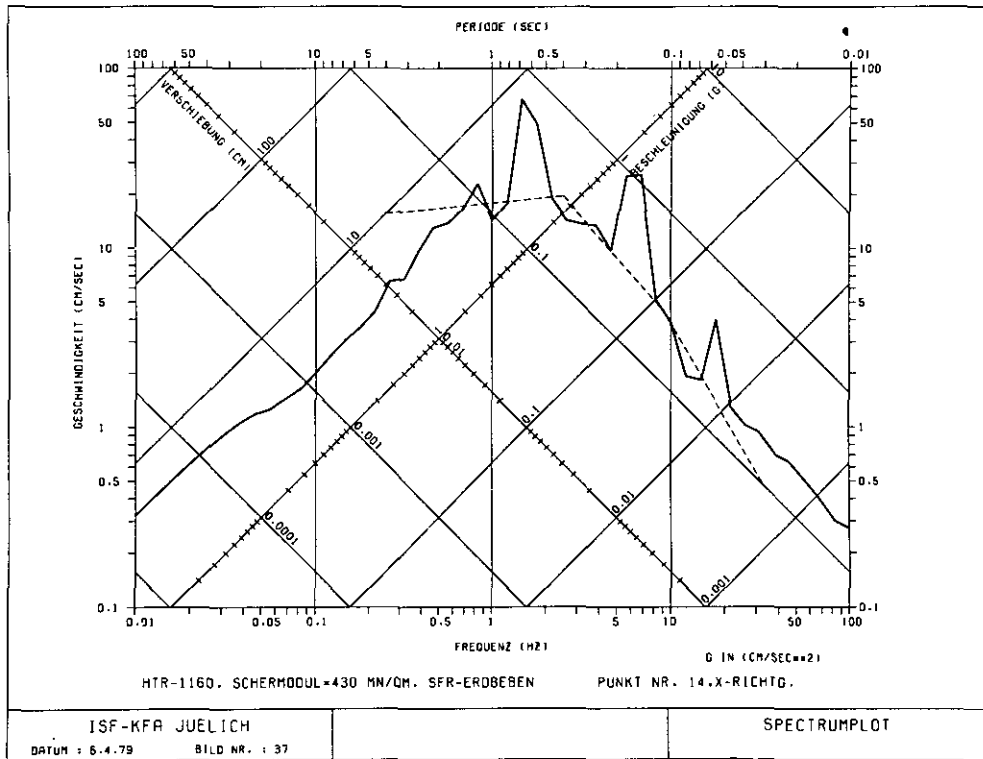


Abb. 29: Etagenantwortspektrum in x-Richtung bei Erregung durch das Golden Gate Erdbeben (Schермодул 430 MN/m²)

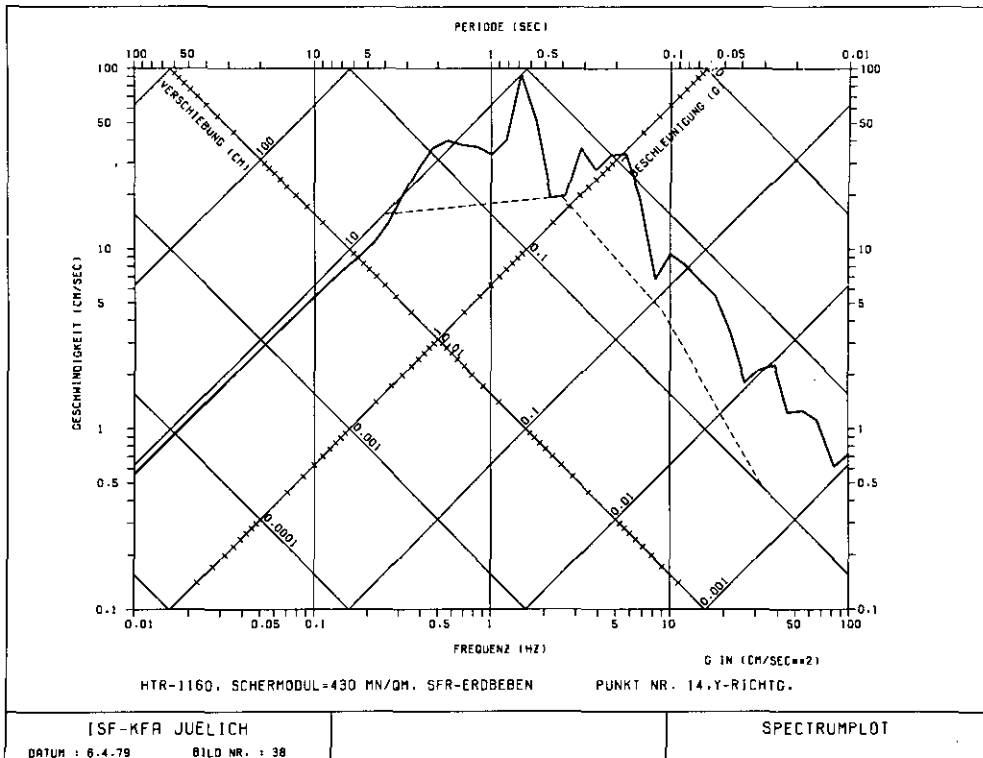


Abb. 30: Etagenantwortspektrum in y-Richtung bei Erregung durch das Golden Gate Erdbeben (Schермодул 430 MN/m²)

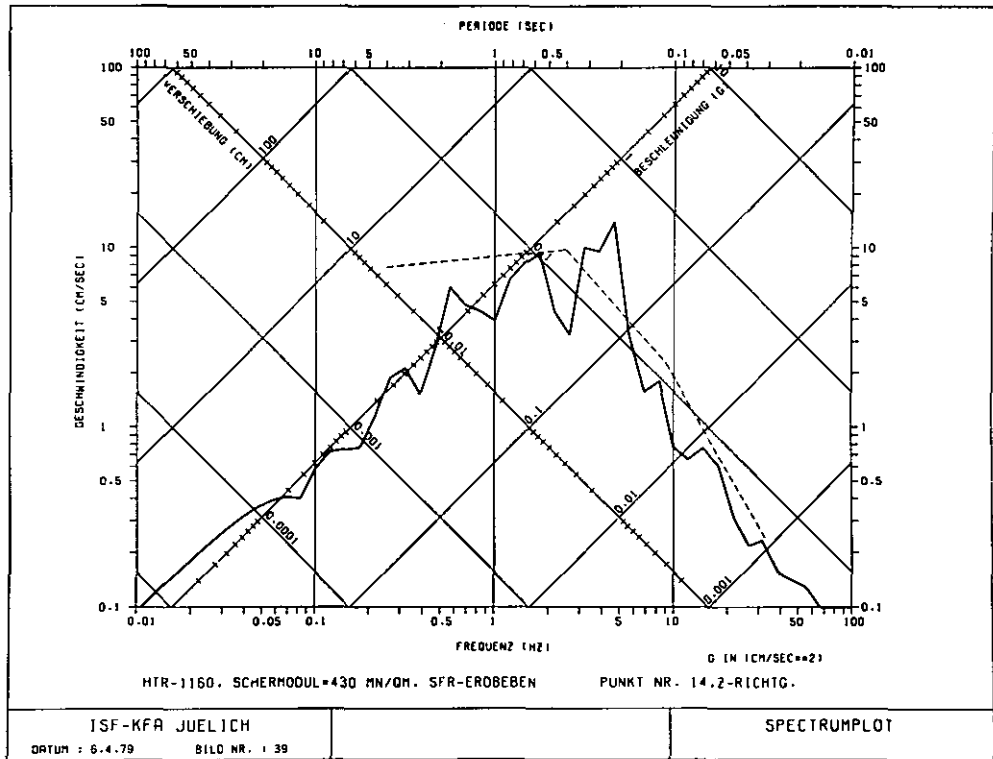


Abb. 31: Etagenantwortspektrum in z-Richtung bei Erregung durch das Golden Gate Erdbeben (Schernodul 430 MN/m²)

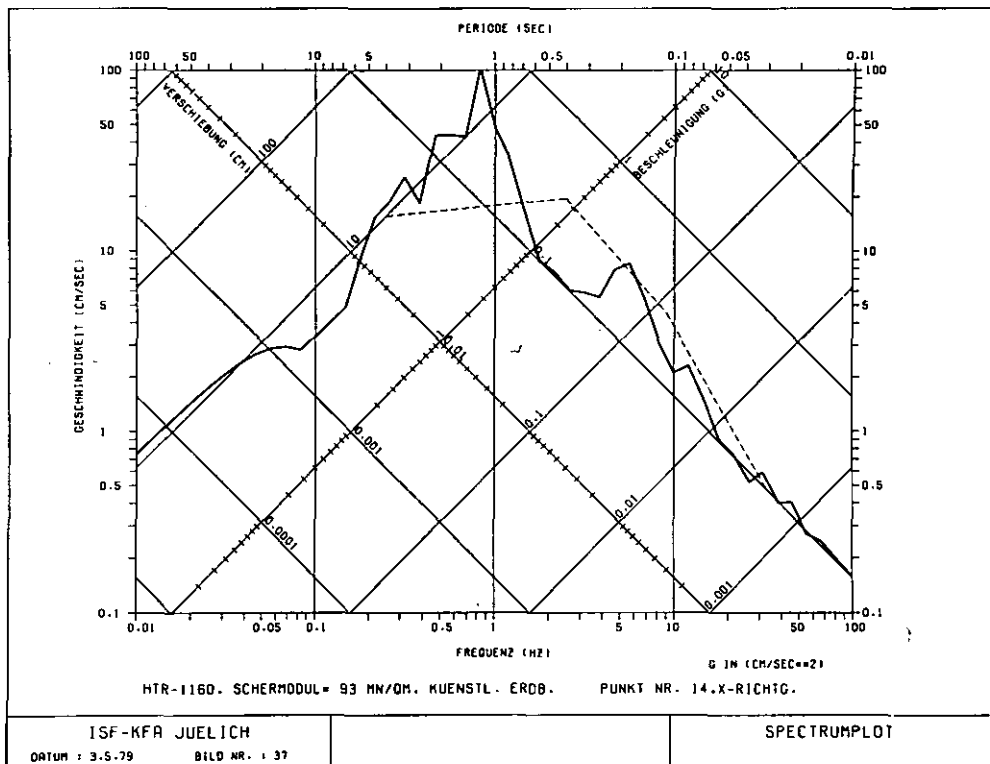


Abb. 32: Etagenantwortspektrum in x-Richtung bei Erregung durch das künstlich erzeugte Erdbeben (Schernodul 93 MN/m²)

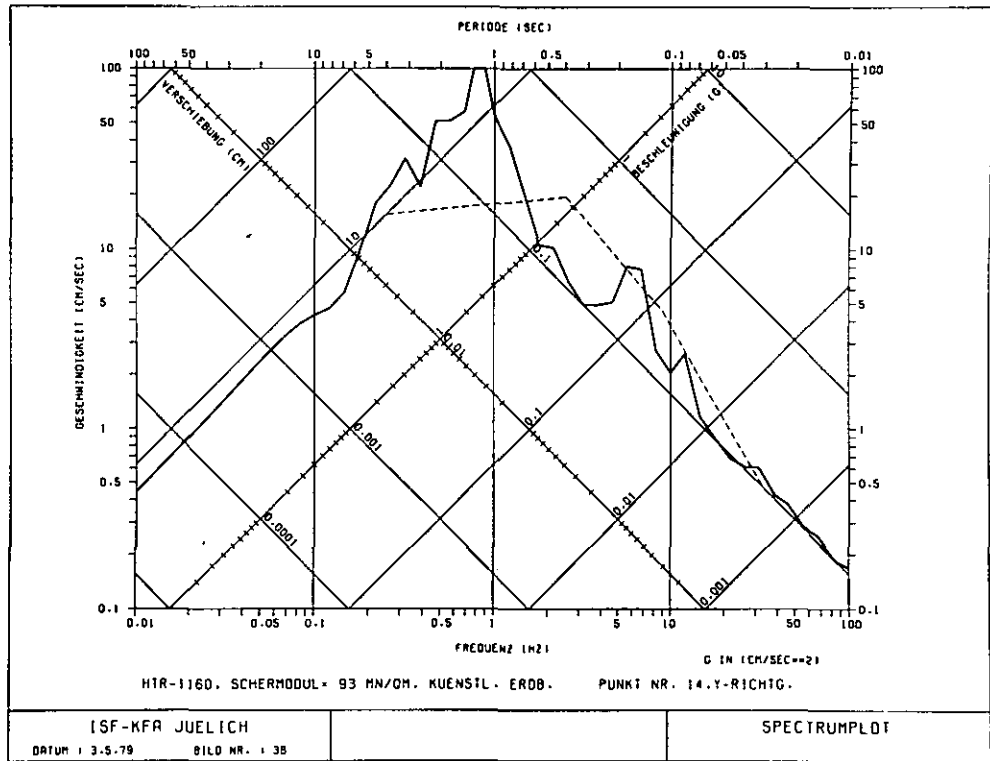


Abb. 33: Etagenantwortspektrum in y-Richtung bei Erregung durch das künstliche Erdbeben (Schermodul 93 MN/m^2)

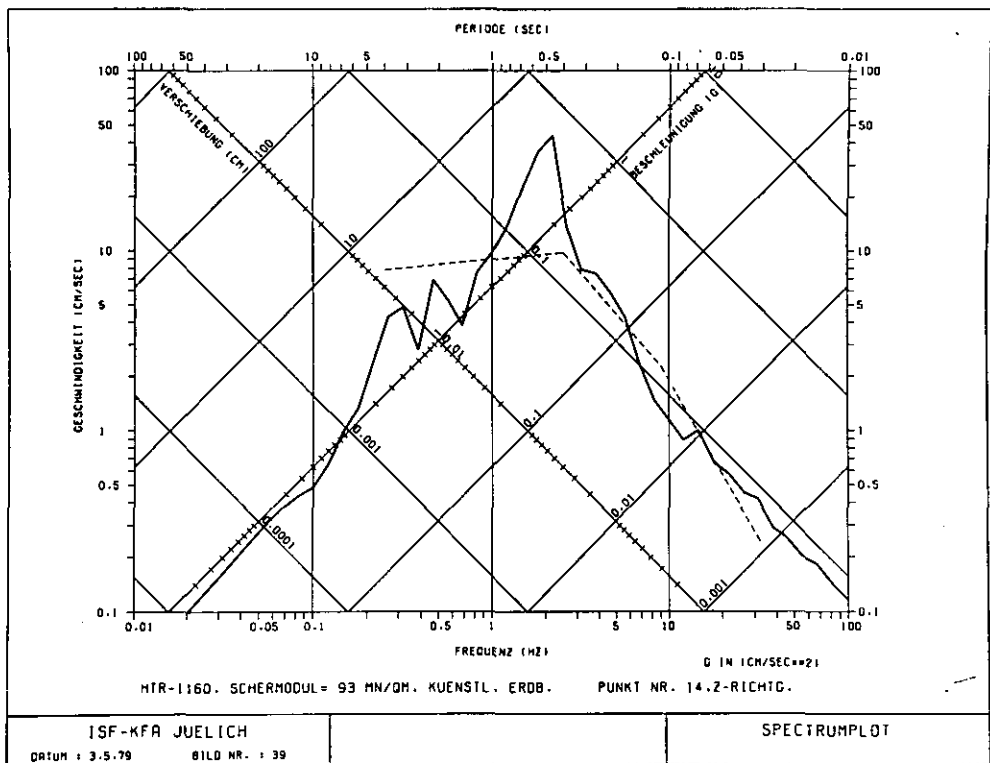


Abb. 34: Etagenantwortspektrum in z-Richtung bei Erregung durch das künstliche Erdbeben (Schermodul 93 MN/m^2)

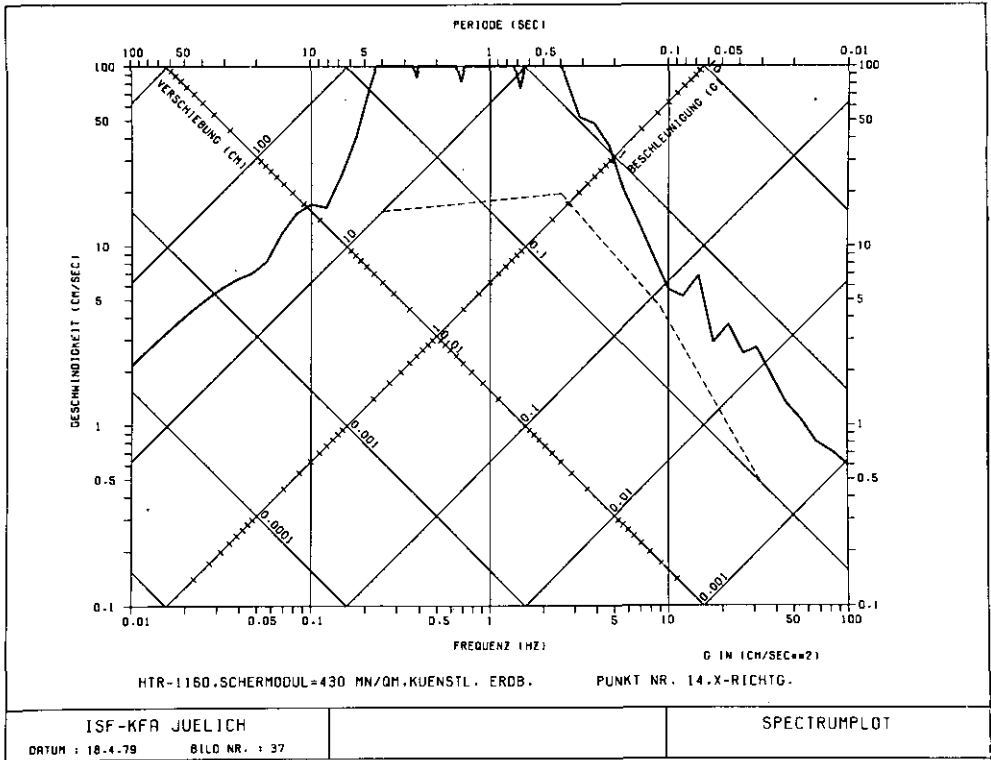


Abb. 35: Etagenantwortspektrum in x-Richtung bei Erregung durch das künstlich erzeugte Erdbeben (Schermodul 430 MN/m^2)

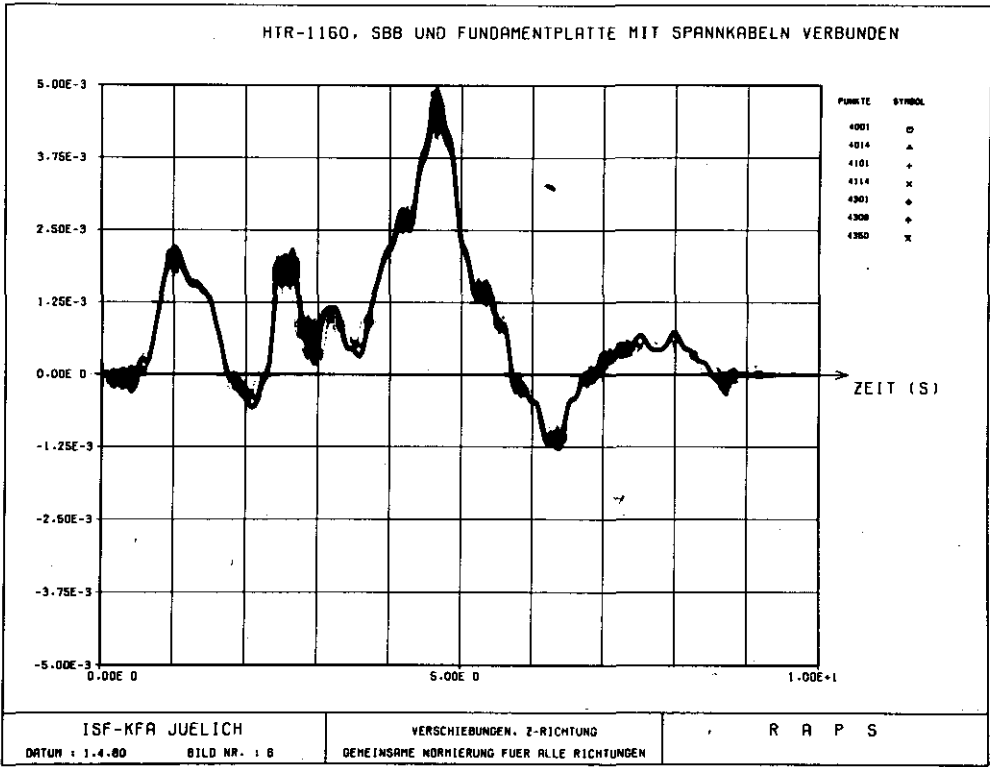


Abb. 36: Verschiebungszeitverlauf für den SBB in vertikaler Richtung (mit Spannkabeln mit der Fundamentplatte verbunden)

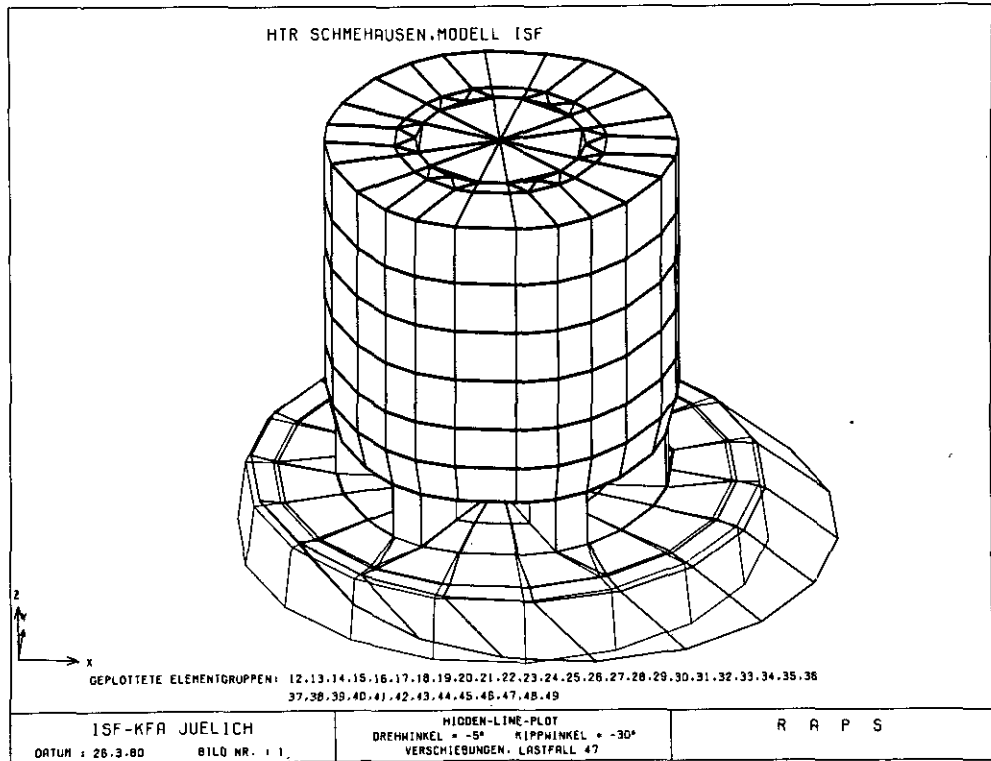


Abb. 37: Verschiebungsbild von SBB und Fundamentplatte zum Zeitpunkt 1,96 sec (SBB und Fundamentplatte mit Spannkabeln verbunden)

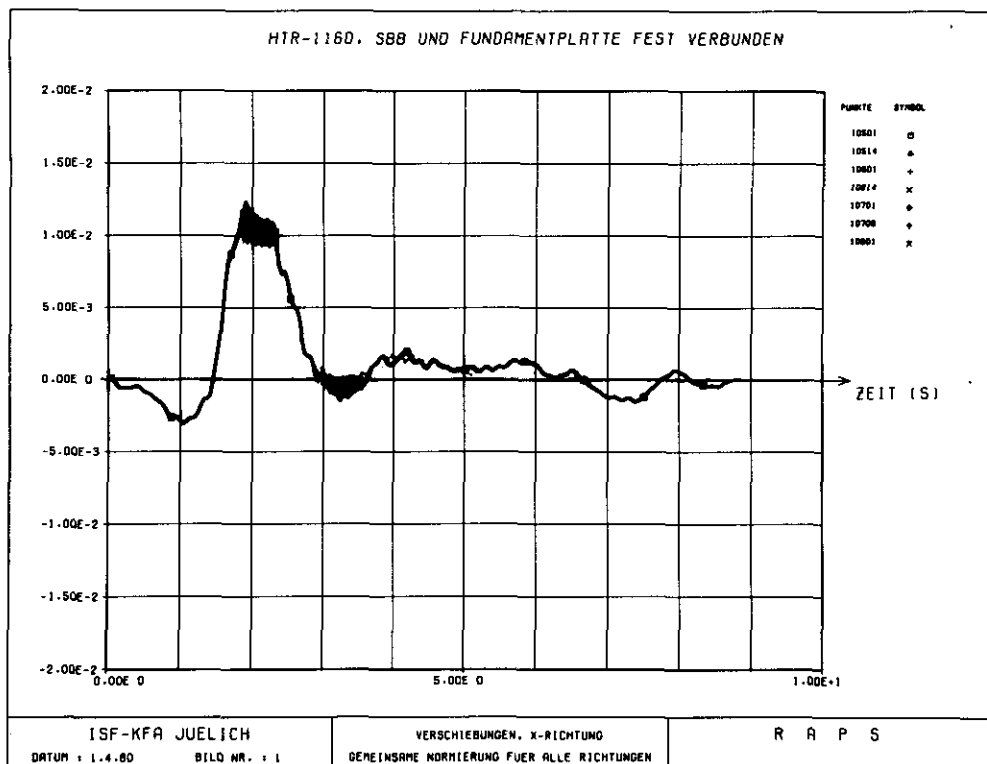


Abb. 38: Verschiebungszeitverlauf für den SBB in x-Richtung (mit der Fundamentplatte fest verbunden)

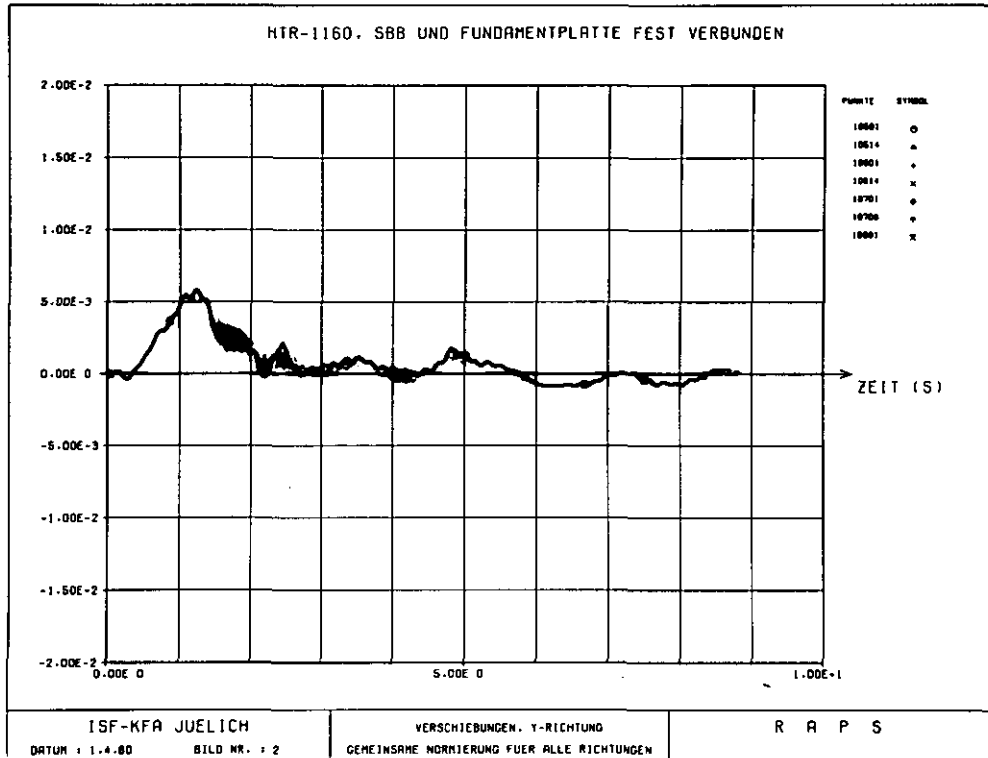


Abb. 39: Verschiebungszeitverlauf für den SBB in y-Richtung
(mit der Fundamentplatte fest verbunden)

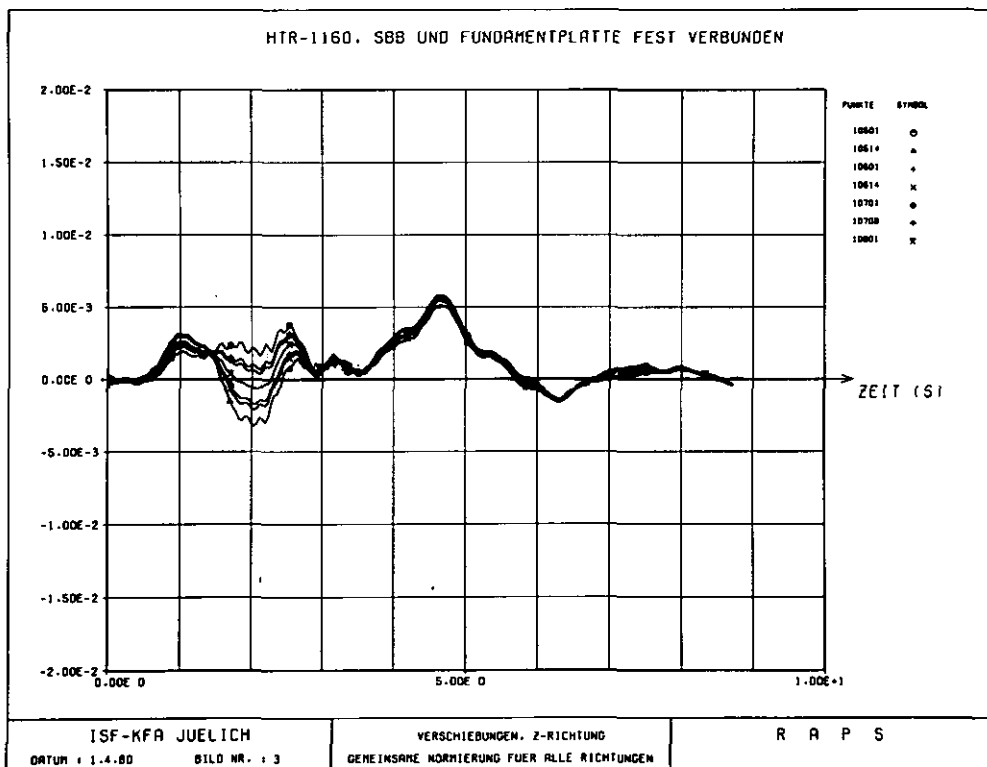


Abb. 40: Verschiebungszeitverlauf für den SBB in z-Richtung
(mit der Fundamentplatte fest verbunden)

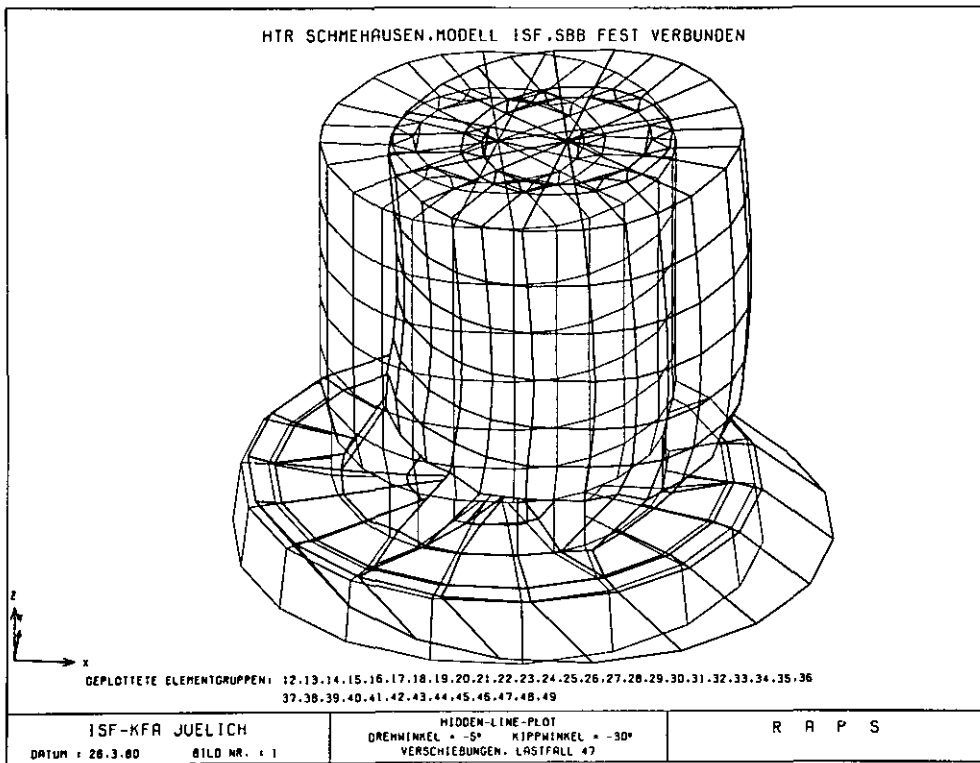


Abb. 41: Verschiebungsbild von SBB und Fundamentplatte zum Zeitpunkt 1,96 sec (SBB und Fundamentplatte fest verbunden)

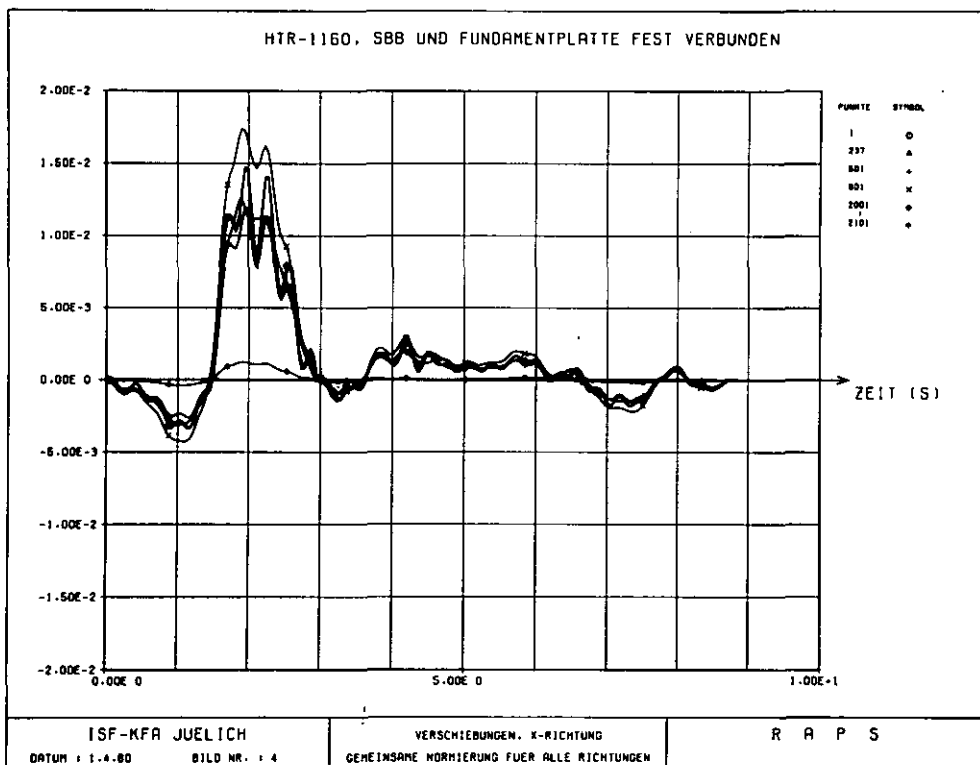


Abb. 42: Verschiebungszeitverlauf des RSG beim detaillierten Modell

A.4 VERSAGENSWAHRSCHEINLICHKEIT VON KOMPONENTEN DES NACHKÜHLSYSTEMS

S. Beliczey, GRS

INHALT	Seite
1. Einleitung	1
2. Allgemeines zu den Erdbebenbelastungen	2
3. Bei Erdbeben besonders belastete Konstruktionsteile	4
4. Versagensmechanismen	8
5. Zusammenhang zwischen Erdbebenstärke und Versagenswahrscheinlichkeit	9
6. Rechenergebnisse	12
7. Zusammenfassung	20
8. Vergleich mit Ergebnissen der AIPA-Studie	22
Schrifttum	23

1. EINLEITUNG

In diesen Ausführungen soll die Versagenswahrscheinlichkeit von Komponenten des Notkühlsystems bei Erdbeben vorgegebener Stärke angegeben werden.

Es wird angenommen, daß alle Komponenten des Notkühlsystems (Hilfskühlsystem) so ausgelegt sind, daß bei Betrachtung der Belastung aus einem Sicherheitserdbeben als Lastfall C - gemäß ASME-Code oder auch deutschen Richtlinien - die Belastungsgrenzen gemäß dieser Regelwerke nicht überschritten werden.

Es werden Überlegungen angestellt, welche Strukturteile oder -geometrien Höchstbelastungen ausgesetzt sind.

Aufgrund der Sichtung spärlicher Meßergebnisse sowie theoretischer Überlegungen wird schließlich eine logarithmische Normalverteilung der Schadenswahrscheinlichkeit als Funktion der maximalen Bodenbeschleunigung angesetzt. Es ergibt sich eine Versagenswahrscheinlichkeit des Hilfskühlsystems unter der Bedingung des Auftretens eines Sicherheitserdbebens im Bereich von $1 \cdot 10^{-4}$ bis $6 \cdot 10^{-2}$. Für ein zweifaches Sicherheitserdbeben wird $1 \cdot 10^{-3}$ bis $2,7 \cdot 10^{-1}$ errechnet. Diese großen Spannen ergeben sich durch den noch großen Entscheidungsspielraum, ob ein Konsolenversagen oder das Versagen einer Rohrwand letztlich das Versagen verursachen.

2. ALLGEMEINES ZU DEN ERDBEBENBELASTUNGEN

Belastungen bei Erdbeben können im wesentlichen durch hohe Beschleunigungskräfte oder durch Kräfte aus großen Relativverschiebungen entstehen. Eine Betrachtung der Etagenantwortspektren /1/ zeigt, daß im Eigenfrequenzbereich von 1 - 10 Hz die 5- bis 10-fachen Werte der maximalen Bodenbeschleunigung als Beschleunigungen an Komponenten auftreten können.

Große Belastungskräfte aus Verschiebungen können entweder durch Relativverschiebungen von Befestigungspunkten (etwa bei Befestigung auf zwei verschiedenen Bodenplatten) oder durch große Auslenkungen schwingender Systeme entstehen. Die dabei auftretenden Spannungen stehen in engem Zusammenhang zu dem Verhältnis der Verschiebungen zu den Abmessungen des Bauteils.

Bei der für Erdbebenlastberechnungen sinnvollen Methode der Modalanalyse unterscheidet die mathematische Behandlung der beiden Belastungsarten sich in den Formeln für die Addition der zu berücksichtigenden Modalwerte.

Eine Betrachtung der Etagenantwortspektren und der Zeitverläufe zweier zu diesen passender Erdbeben an den einzelnen Etagen zeigt folgendes:

Relativverschiebungen von Befestigungspunkten treten innerhalb des Reaktorschutzgebäudes (Containment) nicht auf. Die größten Auslenkungen schwingender Systeme sind im Frequenzbereich 0,1 - 5 Hz zu erwarten.

Generell kann festgestellt werden, daß für Anlagenteile mit höheren Eigenfrequenzen als 10 Hz Vertikalkräfte aus den hier betrachteten Erdbeben (vertikale Bodenbeschleunigung = 0,05 g für einfaches Sicherheitserdbeben (SEB), 0,1 g für zweifaches SEB) keine signifikanten Zusatzbelastungen im Vergleich zu der Stationärbelastung (Gewicht) der Werkstoffe verursachen.

Die Horizontalkräfte können auch bei diesen höheren Eigenfrequenzen aus nur 0,1 g maximaler Etagen-Beschleunigung wesentlich größer sein als die stationäre Belastung in Horizontal-

richtung.

Einige Komponenten des Hilfskühlsystems außerhalb des Containers liegen auf einer anderen Bodenplatte auf als das Container. Somit können Rohrleitungsabschnitte zwischen den beiden Bodenplatten und insbesondere ihre Befestigungspunkte durch Relativverschiebungen belastet werden.

Bei den folgenden Überlegungen zu der Versagenswahrscheinlichkeit spielt die Unterscheidung der Belastungen aus Supportverschiebungen oder aus Auslenkungen keine weitere Rolle. Es wird angenommen, daß die statistische Verteilung der richtungsabhängigen Erregungsfunktionen für beide Belastungsarten die gleiche ist.

3. BEI ERDBEBEN BESONDERS BELASTETE KONSTRUKTIONSTEILE

Da konstruktive Einzelheiten der hier betrachteten Anlage nur sehr mangelhaft bekannt sind, muß die Betrachtung von typischen Bauteilen und Geometrien ausgehen und sich mit der Erfassung von deren Verhalten begnügen.

Als Bestandteile des Hilfskühlsystems werden betrachtet: Konsolen, gerade Rohrleitungsstrecke, Rohrkrümmer, Hilfswärmtauscher und Verankerungen. Die Hilfskühlmittelleitungen haben eine Nennweite von 250 mm.

Für die spätere Bestimmung der Sicherheitsfaktoren der Konstruktion ist es von Wichtigkeit, festzustellen, ob die aus dem Erdbeben herrührenden Kräfte auf die einzelnen Systeme Primär- oder Sekundärspannungen hervorrufen. D.h. - zugeschnitten auf die hier zu lösenden Probleme - ob für das Höchstmaß aus Auslenkung das Erreichen einer bestimmten Widerstandskraft maßgeblich ist, oder ob für das Erreichen der höchsten Auslenkung eine bestimmte Verformung erforderlich ist.

Konsolen

Die Rohrleitungen des Hilfskühlsystems werden mehrfach in ihrem Verlaufe an tragende Teile wie Bühnen oder Gebäudewänden befestigt. Dies geschieht üblicherweise mit Konsolen verschiedener Konstruktionen (z.B. Konsolenpaar mit je einer Konsole zu beiden Seiten einer Steigleitung). Die Verbindung der Rohrleitung mit der Konsole erfolgt i.A. entweder mit Federhängern oder mit Konstanthängern.

Es ergibt sich generell für Konsolen, daß in Vertikalrichtung die Differenz zwischen Lastfall-Kategorie C aus Erdbeben und Auslegungsfall relativ gering ist. Dementsprechend wird für die Auslegung gegen Kräfte in Vertikalrichtung der Auslegungsfall (Stationärlast) maßgeblich sein. In Horizontalrichtung ist diese Differenz groß, da Belastungen aus dem Auslegungsfall gering oder gar Null sein können. Für die Auslegung

gegen Horizontalkräfte werden also i.A. Belastungen aus der Lastfall-Kategorie C maßgeblich sein.

Die Belastung der Systeme Feder-Konsole ist durch die im schwingenden Rohrleitungssystem angehäuften kinetische Energie bestimmt. Zur Beschränkung der Auslenkung aus der Ruhelage ist also keine bestimmte, die Belastbarkeit des Bauteils u.U. überschreitende Kraft, sondern das Erreichen eines bestimmten Kraft x Weg-Wertes erforderlich.

Wenn die über das System Feder-Konsole abtragbare Kraft infolge Fließens nicht gesteigert werden kann, dann wird die kinetische Energie durch eine größere Dehnung im Material-Fließbereich aufgezehrt.

Also wird man zur Bestimmung des Sicherheitsfaktors für die Beschreibung der Belastbarkeitsgrenzen eines Systems Konsole-Feder bei extrem starkem Erdbeben die maximale Dehnbarkeit des Systems heranziehen.

Bei den Überlegungen zum Versagen von Konsolen wird davon ausgegangen, daß nach Sect. III, Div. 1, Appendix XVII des ASME-Code ausgelegt worden ist.

Gerade Rohrleitungsstrecken

Bei Balkenschwingungen von Rohrleitungen als Folge der vorgegebenen Erdbeben bestimmen etwa die ersten 3 Modes die größten Belastungen. Rechnungen ergeben jedoch, daß diese, im wesentlichen durch Biegemomente hervorgerufenen Spannungen bei geraden Rohrleitungen etwa um eine Größenordnung geringer sind als die zulässigen Werte. Dies führt dazu, daß das Verhalten solcher Rohrleitungen hier nicht weiter behandelt werden muß.

Rohrkrümmer

Ein im wesentlichen zur Beherrschung der Wärmedehnungen mit Feder- oder Konstanthängern aufgehängtes Rohrleitungssystem

besitzt, wie man leicht rechnerisch feststellen kann, recht niedrige Eigenfrequenzen (etwa 1 - 5 Hz). Daraus resultieren bei Erdbeben i.A. große Schwingungsamplituden einzelner Rohrleitungsabschnitte. Diese Verschiebungen verformen vor allem die Rohrkrümmer. Letztere müssen schon im Normalbetrieb durch Wärmedehnungen bewirkte Verformungen aufnehmen können.

Für die weiteren Überlegungen von Bedeutung ist die folgende Annahme:

Die Kraftübertragung auf einzelne Rohrleitungsabschnitte erfolgt im wesentlichen durch die Federaufhängungen. Kraftübertragungen durch die Krümmer auf benachbarte Rohrleitungsabschnitte sind hingegen vergleichsweise klein. Dies hat zur Folge, daß die Kräfte in den Krümmern verformungskontrolliert sind. Der Effekt einer etwaigen Innendruckbelastung der Rohrleitung wird hierbei vernachlässigt.

Die Auslegung der Rohrleitungen erfolgt nach NB 3680 des ASME-Code.

Hilfswärmetauscher

Die Hilfswärmetauscher sind hochfrequente Bauteile. Belastungen aus Relativbewegungen sind nicht zu erwarten. Zu betrachten sind jedoch Bereiche der Abstützung und der vorgesehenen Lastabtragung auf den Coreblock bei Erdbebenbelastung. Zu den letzteren könnten mit dem Hilfswärmetauscher verbundene Rohrleitungen gehören. Rohrleitungen großer Nennweite für den Gasdurchfluß sind jedoch mit dem Hilfswärmetauscher nicht direkt verbunden. Solche Rohrleitungen bilden nur die Auskleidung der Gaszu- und abführungsbohrungen und sind nur mit dem Liner der Hilfswärmetauscherkaverne verschweißt. Die Rohrleitungen der Kühlwasserversorgungen haben eine kleine Nennweite, sie dürften hinreichend flexibel sein, um die aus geometrischen Gründen nur geringe mögliche Bewegung des Hilfswärmetauschers in seiner Kaverne ohne Schaden zu überstehen.

Bedingt durch den turmartigen Aufbau des Hilfswärmetauschers

könnten aus den auf ihn wirkenden Beschleunigungskräften jedoch große Biegemomente auf seine Standkonstruktion resultieren.

Verankerungen

Hier sind Verankerungen in Betonstrukturen gemeint. Als Versagensart wird das Herausreißen der Ankerplatte oder des Ankerbügels, je nach Konstruktion, angesehen.

4. VERSAGENSMECHANISMEN

Die in diesem Absatz folgenden Ausführungen beziehen sich nicht nur auf die bei einem ein- oder zweifachen Sicherheitserdbeben denkbaren Versagen, sondern sie beschreiben auch Referenzfälle von Versagen, über deren erdbebenintensitätsabhängige Wahrscheinlichkeitsverteilung im weiteren Aussagen gemacht werden.

Bei einer im Erdbebenfall stark belasteten Komponente wird die Belastung durch wenige Schwingungsausschläge verursacht. Das Versagen erfolgt also nicht durch Ermüdung im üblichen Sinne. Vorherrschend wird ein Bruch entweder bei Auftreten des größten Spannungsausschlages sein oder als Folge einiger ungleicher Spannungs-Dehnungs-Spiele im Zug- und Druckbereich der schwingenden Belastung. Wegen der verwendeten Werkstoffe für Konsolen, Rohrleitungen und Dampferzeuger kann ein Sprödbbruch dieser Komponenten außer Betracht bleiben.

Die vorherrschende Versagensart der Verankerung von Konsolen und stehenden Komponenten dürfte im Reißen des Zugankers bestehen. Das Herausreißen eines Ankerbügels oder einer Ankerplatte aus dem Beton wird nicht erwartet.

Bei Rohrleitungen wird herrührend aus ihrer Schwingbewegung kein katastrophales Versagen, nicht einmal ein größerer Riß erwartet. Der Riß kann jedoch ein erhebliches Leck verursachen. Komponenten vom Typ Feder-Konsole dürften im Bereich von Horizontalfedern versagen.

Die Tragfähigkeit der Vertikalfedern und der Konsole dürfte dabei jedoch erhalten bleiben. In diesem Fall wird davon ausgegangen, daß die Rohrleitungen des betrachteten Systems nach dem Erdbeben keine wesentlichen Verschiebungen erfahren haben. Demzufolge erfolgt keine wesentliche Belastungsumlagerung. Die Integrität der Druckumschließung bleibt erhalten, es können jedoch kleine Lecks entstehen.

5. ZUSAMMENHANG ZWISCHEN ERDBEBENSTÄRKE UND
 VERSAGENSWAHRSCHEINLICHKEIT

Über die belastungsabhängige Versagenswahrscheinlichkeit komplexer Strukturen liegen nur wenige Daten vor. Da die erdbebeninduzierten Belastungen einzelner kritischer Stellen bei komplexen Strukturen nur mit großen Streumargen angegeben werden können, wäre es nicht sinnvoll, sich mit der Kenntnis der Verteilungsfunktionen von z.B. Streckgrenze und Bruchfestigkeit oder der Abmessungen zu begnügen. Dies umso mehr, da die zu betrachtende Struktur in ihren Details gar nicht bekannt ist.

Eine wesentliche Bedeutung muß der Verteilung der Belastung über die einzelnen kritischen Bereiche der Struktur beigemessen werden.

Bei der Prüfung, ob die Struktur seismischen Belastungen standhält, werden Etagenantwortspektren herangezogen, welche die Maximalausschläge getrennt betrachteter einzelner Schwingungsmodes bei Heranziehen einer ganzen Klasse von Erdbeben beschreiben. Die Belastung wird wesentlich durch die Phasenbeziehungen der einzelnen Schwingungsmodes der Struktur und der Relativbewegungen der Fundamentplatten bestimmt. Diese Phasenbeziehungen wiederum hängen von dem unvorhersehbaren Zeitverlauf des Erdbebens ab. Demnach kann über die Phasenbeziehungen nur eine statistische Aussage gemacht werden.

Im weiteren soll die erdbebenstärkeabhängige Wahrscheinlichkeit des Versagens bestimmt werden.

Wenn keine genaueren Gesetzmäßigkeiten des Versagensmechanismus bekannt sind, dann ist die Annahme einer Lognormalverteilung, der zum Versagen führenden maximalen Bodenbeschleunigung empfehlenswert /3/.

In /2/ wird aufgrund mehrjähriger Erfahrung aus Erdbebenschadensmessungen an sehr verschiedenen Bauwerken festgestellt, daß bei vorgegebener Erdbebenintensität die Schadensgröße lognormalver-

teilt ist. Dort wird auch gezeigt, daß dies gleichwertig ist mit der Aussage, daß die maximale Erdbebenbeschleunigung, die zu einem Versagen führt, lognormalverteilt ist.

Demnach ist für ein Erdbeben mit der maximalen Bodenbeschleunigung a die Formel

$$p_f(a) = \Phi \left[\frac{-\ln(SF)}{\gamma_R} \right]$$

für die Versagenswahrscheinlichkeit $p_f(a)$ auszuwerten.

Wobei SF Sicherheitsfaktor bei Erdbeben mit der max. Beschleunigung a .

γ_R ... Varianz der Verteilung der Versagensbeschleunigung mit

$$\gamma_R = \sqrt{\ln(1 + \Omega_R^2)}$$

Ω_R - Variationskoeffizient für die Unsicherheiten von Berechnung und Erdbebenbelastung.

Zu bestimmen ist jetzt der Medianwert und die Varianz dieser Verteilung. Im Abschnitt über die bei Erdbeben besonders belasteten Konstruktionsteile wurde die Frage untersucht, ob die Belastungen dehnungs- oder kraftkontrolliert sind. Es mußte eine der maximalen Erdbebenbeschleunigung proportionale unmittelbare Beanspruchungsgröße der Werkstoffe gefunden werden.

Über den überwiegenden Teil der Strukturen des Hilfskühlsystems wurde die Werkstoffdehnung als diese Beanspruchungsgröße identifiziert. Bei Verankerungsflanschen für steife schlanke Komponenten (kraftkontrollierte Belastung) müssen Spannungswerte als erdbebenintensitätsproportional angenommen werden.

Bei der Betrachtung dehnungskontrollierter Beanspruchungen kann aus den im entsprechenden Regelwerk für die definierte Erdbebenbelastung zulässigen Spannungswerten im allgemeinen über die Kenntnis der Werkstoffkennwerte zulässige Dehnung bestimmt werden. Bei dehnungskontrollierten Belastungen muß für den Medianwert der Verteilungskurve jene Dehnung angegeben werden, für welche die Wahrscheinlichkeit des Versagens $p = 0,5$ ist. Der Wert

dieser Dehnung ist stark werkstoffabhängig. Er wird bei diesen Berechnungen mit $\xi = 4 \%$ angesetzt und um ± 1 variiert. Der Sicherheitsfaktor der Konstruktion gegen Erdbebenbelastung ergibt sich dann als das Zahlenverhältnis dieser Dehnung zu der beim Erdbeben auftretenden Dehnung.

Für kraftkontrollierte Belastungen muß jener Wert der Festigkeit bestimmt werden, bei dem die Versagenswahrscheinlichkeit $p = 0,5$ ist. Es wird angenommen, daß die Bruchfestigkeit normalverteilt ist mit der Dispersion 5% . Wenn angenommen wird, daß der gewährleistete Wert der Bruchfestigkeit S_u um 3σ unterhalb des Medianwertes σ_B liegt, dann ist

$$\sigma_B = S_u \cdot \frac{1}{1-0,15} = 1,18 S_u .$$

6. RECHENERGEBNISSE

Eine wesentliche Schwierigkeit dieser Zuverlässigkeitsbetrachtungen besteht darin, daß es nicht bekannt ist, für welche Bereiche der Konstruktion bei der Auslegung Erdbebenbelastungen die Bemessung bestimmt haben. Für diese Rechnungen wird konservativerweise angenommen, daß sowohl für erdbebenbedingt dehnungskontrolliert als auch für kraftkontrolliert beanspruchte Teile zumindest in einigen Bereichen für die Auslegung die Belastungen bei Erdbeben nach Lastfall Kategorie C maßgeblich waren.

Weiterhin wird angenommen, daß für dehnungskontrolliert belastete Komponenten die gesamte Tragfähigkeit für die Aufnahme der Erdbebenbelastungen zur Verfügung steht. Dies gilt sicher für Horizontalfedern, während es bei Komponenten zum Tragen von Lasten, sowie für Rohrkrümmer nicht gilt, dort jedoch in diesem Modell konservative Ergebnisse liefert.

Für eventuell vorhandene Verankerungen stehender schlanker Komponenten ist eine diesbezügliche Annahme schwieriger. Solche Verankerungen wurden zwar bei der hier betrachteten Anlage nicht gefunden, zur Absteckung möglicher Grenzwerte werden jedoch drei Extremfälle studiert, nämlich einer in dem die Verankerung nur zur Aufnahme erdbebenbedingter Belastungen dient (Fälle 9 und 10 in der Tabelle), einer in dem schon für den Auslegungsfall der dafür zugelassene Spannungswerte ausgenutzt ist, so daß für die Erdbebenbelastung nur die Differenz Fall C und Fall A gem. ASME-Code zur Verfügung steht (Fälle 11 und 12 in der Tabelle) und letztlich einer für den die Erdbebenbelastung den Lastfall A darstellen soll.

Dementsprechend dürfen bei dem einfachen Sicherheitserdbeben in Rohrleitungen maximale Biegespannungen von - elastisch berechnet - $1,5 S_y$ auftreten. Diesem Wert wird eine Dehnung von $\epsilon \leq 0,5 \%$ zugeordnet. Daraus ergibt sich für Rohrleitungen ein Sicherheitsfaktor SF gegen Sicherheitserdbeben von mindestens

$$SF = \frac{4 \ \%}{0,5 \ \%} = 8,0$$

Für den vorgesehenen Standort sind bei Vorgabe des Maximalwertes der Erdbebenbeschleunigung verschiedene Zeitverläufe denkbar. Die angegebenen Antwortspektren sollen eine Einhüllende mehrerer für einzelne solcher Erdbeben berechneter Antwortspektren darstellen.

Es wird vorausgesetzt, daß die für die Auslegung verwendeten Antwortspektren 1ζ -Einhüllende sind. Unter der weiteren Annahme, daß der 1ζ -Wert für diese Einhüllende etwa 30 % beträgt, ergibt sich ein Sicherheitsfaktor SF von etwa

$$SF = 10,4.$$

Für einen Medianwert der Verteilungskurve der Versagensdehnung von 5 % (3 %) ergibt sich ein Sicherheitsfaktor von etwa

$$SF = 13,0 \text{ (7,8)}.$$

Für kraftkontrolliert beanspruchte Verankerungsflansche ergeben sich für Lastfall-Kategorie C die Forderungen

$$\tau \leq 0,53 S_Y \text{ oder } \zeta = 0,8 S_Y.$$

Unter der Annahme

$$\frac{S_Y}{S_u} = 0,7$$

wobei

S_Y = gewährleistete Streckgrenze

S_u = gewährleistete Bruchfestigkeit

ergibt sich, mit den Zugspannungen gerechnet, ein Sicherheitsfaktor SF von

$$SF = \frac{1,18 S_u}{0,8 S_Y} = \frac{1,18}{0,8 \cdot 0,7} = 2,11$$

Wiederum unter der Voraussetzung eines 1σ -Antwortspektrums ergibt sich dieser Wert zu $\sim 2,74$.

Diese letztere Zahl gilt für den Fall, daß die Auslegungsbetriebslast Null ist und nur gegen Erdbebenbelastung als Lastfall C ausgelegt werden mußte (Fall 1). Für den Fall, daß sowohl für die Betriebslast als auch für die Last aus einfachem Sicherheitserdbeben die vollen Grenzbelastungen nach dem ASME-Code ausgenutzt wurden (Fall 2), ergibt sich diese Zahl zu $SF = 2,24$. Für den Extremfall, daß das einfache Sicherheitserdbeben der Auslegungsfall ist (Lastfall A), (Fall 3) ergibt sich der Sicherheitsfaktor zu 2,81 (3,65) ohne (mit) Berücksichtigung des 1σ -Wertes bei Angabe des Response-Spektrums.

Bemerkenswert ist hier, daß in /2/ für Strukturkomponenten ein Sicherheitsfaktor von 10, für Rohrleitungen von 12, für Ausrüstungsteile 4 angegeben wird.

Für das zweifache Sicherheitserdbeben ergeben sich die Sicherheitsfaktoren

Fall 1	SF =	1,37
Fall 2	SF =	1,85
Fall 3	SF =	1,41 (1,82)

Die Varianz der Lognormalverteilung der Versagenswahrscheinlichkeit errechnet sich aus

$$\sigma_{\ln}^2 = \ln (1 + v^2)$$

wobei $V = \frac{\sigma}{\bar{x}}$ Dispersion der zugrundeliegenden Normalverteilung.

Die Verteilung ergibt sich einerseits

- aus dem statistischen Charakter der Belastung

- aus dem Näherungscharakter der Rechenmodelle als entsprechend ungenaue Festlegung der Belastungsgrenzen,

und andererseits

- aus der Verteilung der Festigkeitskennwerte der Werkstoffe.

Die in % ausgedrückte Dispersion dieser einzelnen Beiträge ergibt sich nach /2/ für Gebäude

- für die Strukturantwort:

- | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| a. Definition der Grundbewegung aufgrund der mangelhaft bekannten Geologie und Bodenverhältnisse | 20 % |
| b. Spektrumberechnung | 30 % |
| c. Festlegung der geeigneten Dämpfungskoeffizienten | 30 % |
| d. Mathematische Modellierung der Struktur und des Bodens | 30 % |

- für den Strukturwiderstand:

- | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| e. Festigkeit | 30 % |
| f. Für Rohrleitungssysteme ergibt sich wiederum nach /2/ zusätzlich zu den Unsicherheiten der Strukturantwort eine Unsicherheit von 50 % für die mathematische Modellierung. Hierin ist auch die Dispersion der Verteilung der Versagensdehnung des Rohrleitungswerkstoffes enthalten. | |

Demnach ergibt sich für die Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit von Rohrleitungen und Feder-Konsole Systemen die Gesamtdispersion

$$v = \left[0,2^2 + 3 \times 0,3^2 + 0,5^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0,748$$

und die Varianz der Lognormalverteilung

$$\sigma_{\ln} = \sqrt{\ln(1 + 0,748^2)} = 0,67$$

Für die Berechnung der Gebäudeversagenswahrscheinlichkeit müßte mit der Dispersion

$$v = \left[0,2^2 + 4 \times 0,3^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0,63 \text{ und der Varianz}$$

$$G_{ln} = \sqrt{\ln(1 + 0,63^2)} = 0,58 \text{ gerechnet werden /2/}.$$

Über die dabei einzusetzenden Sicherheitsfaktoren werden hier keine Überlegungen angestellt. Es wird im weiteren lediglich vorausgesetzt, daß kein Gebäudeversagen auftritt.

Bei der angenommenen kraftkontrollierten Belastung von Behälterverankerungen werden für die Berechnung der Dispersion die Unsicherheiten der Rohrleitungsmodellierung nicht angesetzt. Hier tritt bei dem Strukturwiderstand nur die Streuung der Bruchfestigkeit mit $V = 0,05$ auf.

Mithin ergibt sich

$$v = \left[0,2^2 + 3 \times 0,3^2 + 0,05^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0,559 \text{ und}$$

$$G_{ln} = 0,52$$

Bei Rohrleitungsverankerungen sollte jedoch mit der Varianz

$$G_{ln} = 0,67$$

gerechnet werden.

In den bisherigen Überlegungen ist explizit auf den Einfluß der Komplexität der betrachteten Anlage auf ihre Versagenswahrscheinlichkeit nicht eingegangen worden. Desgleichen nicht auf eine Definition des Versagens.

Eigentlich müßte in die Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit die Größe oder Komplexität des untersuchten Anlagenteils eingehen. Wenn das System aus vielen gleichartig belasteten Teilen bestünde, müßte die Versagenswahrscheinlichkeit über

eine Extremwert- oder log-Extremwert-Verteilung behandelt werden. Diese Verteilungen würden sich erst außerhalb der etwa 5 bzw. 95 % Quantile von den hier allgemein zugrundegelegten Normal- und Lognormalverteilungen unterscheiden. Dieser Bereich ist wohl zuwenig mit Daten belegt, um eine Entscheidung zugunsten einer dieser Verteilungen zu treffen. Im folgenden werden Vereinfachungen vorgenommen, um die für größere Gesamtanlagen angewandte Methode auch für ein Teilsystem verwenden zu können.

Ein Teilsystem, wie das Nachkühlssystem wird über seine einzelnen Orte einer stark streuenden erdbebenbedingten Belastung ausgesetzt sein. Daraus kann gefolgert werden, daß, wenn eine bestimmte Mindestleckage als Kriterium für ein Versagen angesehen werden kann, dies Leckage sich vorzugsweise an einen einzigen Ort und nicht als viele kleine Leckagen an vorhandenen Orten bilden wird.

Im weiteren ist die Frage zu beantworten, welche Stellen als potentiell versagend angesehen werden müssen.

Es kann festgestellt werden, daß, während das gesamte Nachkühlssystem gegen einfaches Sicherheitserdbeben ausgelegt ist, es nur einige wenige bestimmte Stellen enthält, für deren Auslegung auch die Belastung aus dem einfachen Sicherheitserdbeben maßgeblich war. Ein Versagen kann theoretisch an allen Stellen des Nachkühlsystems erfolgen. Es wird hier jedoch angenommen, daß die Versagenwahrscheinlichkeit an den Stellen, für deren Auslegung das einfache Sicherheitserdbeben maßgeblich war, um mindestens eine Größenordnung größer ist als an den übrigen Stellen des Nachkühlsystems.

Die Versagenwahrscheinlichkeit der Gesamtstruktur ergibt sich dann näherungsweise als die Wahrscheinlichkeit, daß mindestens eine jener Stellen versagt, für deren Auslegung das "Einfache Sicherheitserdbeben" maßgeblich war.

Bei den hier gemachten Rechnungen wurde vorausgesetzt, daß bei dem rechnerischen Nachweis der aseismischen Auslegung nur an einer Stelle die maximal zulässigen Belastungswerte erreicht

werden. Es wird gleichzeitig unterstellt, daß die Lognormalverteilung der maximalen Bodenbeschleunigung, die zum Versagen führt, für Strukturen gilt, die auch nur eine Schwachstelle bezüglich einer Erdbebenbelastung aufweisen.

Wir betrachten jetzt in der Rohrleitung jene Stelle, für deren Auslegung der Lastfall "Einfaches Sicherheitserdbeben" maßgeblich war.

Die Versagenswahrscheinlichkeit dieser Stelle bei einfachem Sicherheitserdbeben ergibt sich zu

$$\Phi \left[\frac{\ln \left(\frac{1}{10,4} \right)}{0,67} \right] = \Phi (-3,49) = 1 - \Phi (3,49) \approx 3,5 \cdot 10^{-4}$$

wobei Φ (...) ... Verteilungsfunktion bei Normalverteilung.

In der Tabelle 1 werden die Ergebnisse zu solchen Überlegungen für verschiedenartige Schwachstellen dargestellt.

Die Spalte "Auslegung" weist schematisch auf den Belastungsbereich hin in Anlehnung an den ASME-Code, der für die Erdbebenbelastung in Anspruch genommen wird.

Ungerade (gerade) Fallnummern stellen Versagenswahrscheinlichkeiten bei einfachem (zweifachem) Sicherheitserdbeben dar. Die Fälle 1 bis 8 stehen für dehnungskontrolliert beanspruchte Strukturen, während 9 bis 12 für kraftkontrolliert belastete Komponenten berechnet wurden. Deutlich höher sind die Sicherheitsfaktoren und entsprechend geringer die Versagenswahrscheinlichkeiten bei den ersteren. Der Sicherheitsfaktor der ersten vier Fälle entspricht der Annahme eines 1 $\frac{1}{2}$ -Etagenantwortspektrums und eines Medianwertes von 4 % für die Bruchdehnung. Die Varianz 0,67 ergibt sich aus allen Unsicherheiten der Berechnung der Etagenantwortspektren und der Antwort des Rohrleitungssystems. 0,65 ergibt sich bei der Berücksichtigung einer geringeren Zahl von Unsicherheiten.

Die Sicherheitsfaktoren 13,0 und 7,8 ergeben sich, wenn ein

Medianwert von 5 bzw. 3 % für die Bruchdehnung angesetzt wird. Die Sicherheitsfaktoren bei den kraftkontrollierten Belastungen (Verankerungen) 2,24 und 2,74 ergeben sich, je nach dem, ob für die Auslegung, die für die Lastfallkategorie A vorgesehenen maximal zulässigen Spannungsgrenzwerte bereits ausgenutzt wurden oder ob die Verankerung nur für den Lastfall C vorgesehen ist. Der geringere Sicherheitsfaktor des Falles 11 gegenüber Fall 9 ergibt sich dadurch, daß der 1 σ -Wert der Belastung im zweiten Fall sich nur auf die Belastungsspanne zwischen Fall C und Fall A bezieht.

Über die Vertrauensgrenzen der hier aufgeführten Werte kann zur Zeit nichts gesagt werden. Für Rohrleitungen kann generell festgestellt werden, daß das zweifache Sicherheitserdbeben die Versagenswahrscheinlichkeit etwa um den Faktor 20 - 30 erhöht. Man sieht, daß bei allen hier vernünftig erscheinenden Annahmen die Versagenswahrscheinlichkeit der Rohrleitungen bei Auftreten sogar eines doppelten Sicherheitserdbebens gering ist.

Die Hilfswärmetauscher sitzen relativ eng in ihren Kavernen. Ihre Last wird über Schürzen abgetragen, die sich bereichsweise überlappen. Horizontale Auslenkungen infolge erdbeben-induzierter Schwingungen sind nur um einige cm möglich. Resultierende Belastungen müßten durch Verformungen der Schürze weitgehend reduziert werden können. Demgemäß wird angenommen, daß sich auch diese Komponenten wie die Rohrleitungen verhalten.

Wo Verankerungen eine Rolle spielen, ist die Versagenswahrscheinlichkeit wesentlich größer. Derartige Erkenntnisse müßten jedoch dahin führen, daß zusätzliche Abstützungen solcher Komponenten auch hier die Versagenswahrscheinlichkeit auf die Werte der Rohrleitungen drücken. Dies wäre eine Forderung, die über die heute bestehenden Auslegungsregelwerke hinausginge. Für Rohrleitungen hingegen ergeben sich ausreichende Sicherheitsfaktoren.

7. ZUSAMMENFASSUNG

Da konstruktive Einzelheiten der hier betrachteten Anlage nur sehr mangelhaft bekannt sind, muß die Betrachtung von typischen Bauteilen und Geometrien ausgehen und sich mit der Erfassung von deren Verhalten begnügen.

Eine wesentliche Schwierigkeit dieser Zuverlässigkeitsbetrachtungen besteht darin, daß es nicht bekannt ist, für welche Bereiche der Konstruktion bei der Auslegung Erdbebenbelastungen die Bemessung bestimmt haben. Für diese Rechnungen wird konservativerweise angenommen, daß sowohl für erdbebenbedingt dehnungskontrolliert als auch für kraftkontrolliert beanspruchte Teile zumindest in einigen Bereichen für die Auslegung die Belastungen bei Erdbeben nach Lastfall-Kategorie C (Emergency) maßgeblich waren.

Weiterhin wird angenommen, daß für dehnungskontrolliert belastete Komponenten die gesamte Tragfähigkeit für die Aufnahme der Erdbebenbelastungen zur Verfügung steht. Dies gilt sicher für Horizontalfedern, während es bei Komponenten zum Tragen von Lasten, sowie für Rohrkrümmer nicht gilt, dort jedoch in diesem Modell konservative Ergebnisse liefert.

Bei Verankerungen ist zu erwarten, daß durch Erdbeben bewirkte Zusatzlasten im allgemeinen nur einen geringen Teil der Auslegungsbelastung ausmachen. Eine Ausnahme davon dürften evtl. vorhandene Fußverankerungen stehender schlanker Komponenten sein. Für diese sind gut begründbare Belastungsannahmen schwer zu finden. Solche Verankerungen wurden zwar bei der hier betrachteten Anlage nicht gefunden, zur Abdeckung möglicher Grenzwerte wurden jedoch drei mögliche Fälle studiert. Zwei, bei denen die Verankerung nur zur Aufnahme erdbebenbedingter Belastung dient. Dabei bildet bei einem das Sicherheitsbeden den Belastungsfall A, beim anderen den Belastungsfall C gemäß ASME-Code. Im dritten Fall werden schon für den Normalbetrieb die Spannungen bis zum Grenzwert gemäß A angesetzt, und für die Erdbebenbelastung wird der zulässige Spannungsbereich zwischen A und C angesetzt.

Für Rohrleitungen und Hilfswärmetauscher ergibt sich rechnerisch

bei einem einfachen Sicherheitserdbeben eine bedingte Versagenswahrscheinlichkeit im Bereich $7 \cdot 10^{-5} - 2,5 \cdot 10^{-4}$. Für ein zweifaches Sicherheitserdbeben $1,2 \cdot 10^{-3} - 6,9 \cdot 10^{-3}$.

Die hier angegebenen Bereiche dürfen jedoch nicht als statistische Vertrauensbereiche verstanden werden. Die Bereichsgrenzen sind lediglich die Extremwerte von Rechenergebnissen mit verschiedenen Annahmen über die anzuwendende Statistik sowie über unbekannte Werkstoffeigenschaften, sofern ihnen keine statistische Verteilung zugeschrieben werden konnte.

Über das Ausmaß des Versagens, insbesondere die resultierende Leckagenmenge kann hier nichts ausgesagt werden.

Für nach den Auslegungscodes zulässige Verankerungskonstruktionen ergibt sich eine bedingte Versagenswahrscheinlichkeit bei einem einfachen Sicherheitserdbeben im Bereich $6 \cdot 10^{-3} - 6 \cdot 10^{-2}$.

Für ein zweifaches Sicherheitserdbeben $1,2 \cdot 10^{-1} - 2,7 \cdot 10^{-1}$.

Bei diesen Zahlen für Verankerungen ist jedoch hinzuzufügen, daß wahrscheinlich für einen überwiegenden Teil dieser Verankerungen, ihr Versagen kein Strukturversagen der Rohrleitungen bewirken wird.

Alle diese genannten Zahlen beziehen sich auf die Versagenswahrscheinlichkeit einer vorgegebenen Stelle, die dadurch ausgezeichnet ist, daß für ihre Auslegung die errechnete Belastung aus dem einfachen Sicherheitserdbeben maßgeblich war. Es ist fraglich, ob dies für irgendeine Stelle des Hilfskühlsystems, insbesondere aber für die Verankerungen zutrifft. Die für Grenzbelastungen aus anderen Betriebszuständen ausgelegten Komponenten haben also einen größeren Sicherheitsfaktor gegenüber Erdbebenbelastungen als hier angenommen werden mußte. Dadurch ergibt sich wahrscheinlich eine wesentliche Verringerung der hier berechneten Wahrscheinlichkeitswerte.

8. VERGLEICH MIT ERGEBNISSEN DER AIPA-STUDIE

Betrachtete Systemteile

In der AIPA-Studie wird im wesentlichen die Funktionsfähigkeit mechanisch beweglicher Systemteile betrachtet, so die Zuverlässigkeit des Anfahrens des Hilfskühlsystems oder der Reaktor-gebäudeisolation, unter den Bedingungen der Erdbebenbelastung. In diesem Beitrag werden Festigkeitsüberlegungen angestellt. Es wird der Bruch von Rohrleitungen und Verankerungen untersucht.

Bei einer vollständigen Studie müssen beide Überlegungsarten angestellt werden. Die Unsicherheiten der Zuverlässigkeit von kinematischen Vorgängen und Ansteuerungen scheinen jedoch noch größer zu sein als die der Rißentstehung und des Bruches.

Methode

Die Rechenmethoden der AIPA-Studie und dieses Berichtes sind identisch. Es wird eine Lognormalverteilung der Versagenswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Erdbebenbelastung angesetzt. In diesem Bericht wurde der Sicherheitsfaktor als Koeffizient

$$SF = \frac{\text{Medianwert bezüglich Versagenswahrscheinlichkeit}}{\text{Auslegungswert gem. betrachteten ASME-Load Case}}$$

benutzt. Die Dispersion der Verteilung errechnet sich aus Unsicherheiten der Daten und der mathematischen Modelle für den Untergrund, die Geometrie und die Werkstoffe.

Vorschläge zur Verbesserung der Konzeption der Anlage.

Für die Beurteilung der aseismischen Auslegung der Anlage sind ihre konstruktiven Einzelheiten zu wenig bekannt. Demzufolge können hier keine Verbesserungsvorschläge gemacht werden.

Schrifttum

- /1/ siehe Kap. A.3 "Beanspruchung von Reaktorschutzgebäude, Spannbetonbehälter und Komponenten" dieses Fachbandes
- /2/ UKAEA SRD R 135 M.A.H.G. Alderson
A method for the estimation of the probability
of damage due to earthquakes
- /3/ Addendum to Seminar Preprints of the 2nd internat.
Seminar on Structural Reliability of mechanical
Components, Aug. 1979, Berlin
- /4/ siehe Kap. A.1 "Lastannahmen und Überschreitenswahrscheinlichkeiten" dieses Fachbandes

Tabelle 1: Versagenswahrscheinlichkeiten für einfaches und zweifaches Sicherheitserdbeben bei Variation von Verteilungsparametern

Fall Nr.	Erdbeben	Auslegung	Sich. Fakt.	Varianz der Lognormal- verteilung	Komponente	bedingte Versagens- wahrscheinlichkeit einer bestimmten Stelle
1	1 *	O - C	10,4	0,67	Rohrl., Federn	$2,5 \cdot 10^{-4}$
2	2 *	O - C	5,2	0,67	dito	$6,9 \cdot 10^{-3}$
3	1	O - C	10,4	0,65	dito	$(2,0 \cdot 10^{-4})$
4	2	O - C	5,2	0,65	dito	$(5,6 \cdot 10^{-3})$
5	1	O - C	13,0	0,67	dito	$7,0 \cdot 10^{-5}$
6	2	O - C	6,5	0,67	dito	$2,6 \cdot 10^{-3}$
7	1	O - C	7,8	0,67	dito	$1,2 \cdot 10^{-3}$
8	2	O - C	3,9	0,67	dito	$2,1 \cdot 10^{-2}$
9	1	O - C	2,74	0,52	Veranke- rungen	$2,6 \cdot 10^{-2}$
10	2	O - C	1,37	0,52	dito	$2,7 \cdot 10^{-1}$
11	1	A - C	2,24	0,52	dito	$6,1 \cdot 10^{-2}$
12	2	A - C	1,85	0,52	dito	$1,2 \cdot 10^{-1}$
13	1	O - A	3,65	0,52	dito	$6,4 \cdot 10^{-3}$
14	2	O - A	1,82	0,52	dito	$1,3 \cdot 10^{-1}$

* "1" einfaches SE, "2" zweifaches SE

A.5 VERSAGEN VON BAUTEILEN

K. Schimmelpfennig, R. Zinn -
Zerna, Schnellenbach und Partner, Bochum

INHALT	Seite
1. Versagenswahrscheinlichkeit des Reaktorschutz- gebäudes	1
2. Beanspruchungen des Schaltanlagegebäudes	4
Schrifttum	6
Abbildungen	7

1. Versagenswahrscheinlichkeit des Reaktorschutz-
gebäudes

Grundlage für die Erdbebenuntersuchungen im Rahmen von PSH-Ib sind die von AHORNER angegebenen Bemessungsgrundlagen für den Standortbereich Schmehausen. Mit den dort angegebenen seismischen Kenndaten wurden vom ISF die Erdbebenbeanspruchungen des Reaktorschutzgebäudes (RSG) an einem Finite-Elemente-Stabmodell ermittelt. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in den Kapiteln A.1 und A.3 dieses Fachbandes zusammengestellt.

Die größten Beanspruchungen ergeben sich danach für ein künstlich erzeugtes Erdbeben (derart, daß das vorgegebene Antwortspektrum umschrieben wird) und einen dynamischen Schubmodul des Baugrundes von 430 MN/m^2 , das ist der obere Grenzwert der angesetzten Bandbreite. Nach /1.3.3/ ergeben sich für den Horizontalschnitt durch das RSG direkt oberhalb der Bodenplatte folgende Schnittgrößen:

Normalkraft:	$N = -12,01 \text{ MN}$
Querkraft:	$Q_x = 40,35 \text{ MN}$
	$Q_y = 42,08 \text{ MN}$
Biegemoment:	$M_x = -1915 \text{ MNm}$
	$M_y = -1871 \text{ MNm}$
Torsionsmoment:	$T = 0,1284 \text{ MNm}$

Dieser Schnitt ist für das Versagen des RSG als Gesamttragwerk maßgebend. Aus den Größenordnungsrelationen der angegebenen Schnittgrößen ergibt

sich, daß Torsionsmoment und auch Querkraft bei der Aufstellung einer Versagensformel vernachlässigt werden können. Weiter ergibt sich aus der Relation von Normalkraft (einschließlich Eigenlast des RSG) und resultierendem Biegemoment, daß ein Druckversagen des Betons der kritische Fall ist.

Bei deterministisch vorgegebener Erdbebenbeanspruchung wie im hier vorliegenden Fall enthält demnach die zu betrachtende Versagensformel als einzige stochastische Größe die Betondruckfestigkeit β_c . Mit den Festigkeitskennwerten der DIN 1045 für den vorgesehenen Beton B 25, unter Ansatz der für Auslegung für äußere Einwirkungen üblichen Nacherhärtung gegenüber der 28-Tage-Festigkeit um 20 % sowie unter Annahme einer Normalverteilung ergeben sich als Kenngrößen für die Druckfestigkeit:

- Mittelwert: $\bar{\beta}_c = 36 \text{ N/mm}^2$,
- Standardabweichung $\sigma_{\beta_c} = 3,65 \text{ N/mm}^2$.

Die Geometrie des untersuchten Querschnitts ist beschrieben durch

- den Innenradius: $R_i = 20,00 \text{ m}$,
- die Wandstärke: $d = 1,60 \text{ m}$.

Die Eigenlast des RSG beträgt für den untersuchten Schnitt 436,5 MN.

Mit diesen Daten ergibt sich die Versagenswahrscheinlichkeit des RSG unter den eingangs angegebenen Beanspruchungen infolge Sicherheitserdbeben zu

$$P_f = 2,4 \cdot 10^{-19} \quad .$$

Für ein Erdbeben mit 2-facher Maximalbeschleunigung derer des Sicherheitserdbebens ergibt sich die Versagenswahrscheinlichkeit des RSG zu

$$P_f = 5,6 \cdot 10^{-18} \quad .$$

Diese geringen Wahrscheinlichkeiten erklären sich dadurch, daß im ersten Falle die maximale Betondruckspannung im Bereich von nur 10 %, im zweiten Falle im Bereich von nur 13 % des Mittelwertes der Betondruckfestigkeit liegt.

Bezüglich der Versagenswahrscheinlichkeit des Materialtores gelten folgende Überlegungen:

Die Schnittgrößen infolge Erdbeben werden mit größer werdender Gebäudehöhe kleiner. In Höhe des Materialtores betragen die Biegemomente nur ca. 1/3 derer an der Oberkante der Sohlplatte. Andererseits ist hier der Gebäudequerschnitt gleich dem für OK Sohlplatte angesetzt. Außerdem würde die Stahlbetonstruktur um das Materialtor derart ausgeführt werden, daß hier mit Sicherheit keine Schwachstelle entsteht (wobei die Auslegung für Flugzeugabsturz maßgebend für die Dimensionierung ist). Aus alledem kann gefolgert werden, daß die Versagenswahrscheinlichkeit für die das Materialtor umgebende Betonstruktur bei Erdbeben kleiner als diejenige für das Gesamttragwerk des RSG ist.

Das gleiche gilt unter Bezug auf die entsprechende Aussage bezüglich Explosion zündfähiger Gemische im RSG-Innern auch für das Materialtor selbst.

Über den Kran im RSG auf + 46,50 m liegen den Verfassern keine technischen Unterlagen vor, die eine rechnerische Behandlung der Versagenswahrscheinlichkeit erlauben. Aus den Erfahrungen mit anderen Kernkraftwerken heraus kann jedoch gesagt werden, daß die Versagenswahrscheinlichkeit einer solchen Krananlage selbst unter zweifachem Sicherheitserdbeben vernachlässigbar gering ist.

2. Beanspruchungen des Schaltanlagegebäudes

Im Laufe der Untersuchungen zu PSH-Ib wurde den Verfassern die zusätzliche Frage vorgelegt, wie das Verhalten des Schaltanlagegebäudes bei 2-fachem Sicherheitserdbeben zu bewerten sei und welche Beanspruchungen sich insbesondere für die Batterien und Schaltschränke in diesem Gebäude ergäben.

Einzig hierfür verfügbare Unterlage war der HTR-Sicherheitsbericht /1/. Mit Hilfe der darin enthaltenen, nur sehr kleinmaßstäblichen Grundriß- und Schnittzeichnungen sowie unter Heranziehung der Nutzlastangaben in Belastungsplänen für andere Schaltanlagegebäude wurde eine abschätzende Massenermittlung vorgenommen. Hier sei nur die Summe der geschoß- bzw. bühnenweise vorgenommenen Massenermittlung angegeben. Diese beträgt ca. 43.800 t, das entspricht etwa dem durchaus plausiblen Wert von $1,0 \text{ t/m}^3$ umbauten Raumes.

Die dynamischen Berechnungen erfolgten an einem Finite-Elemente-Schwingungsmodell mit 12 Freiheitsgraden. Wegen der annähernd quadratischen Grundfläche des Gebäudes (40,0 m x 49,2 m) wurde nur die Längsrichtung des Gebäudes betrachtet, d.h. Schwingungen in Richtung der 49,2 m langen Bauwerksachse. Dies dürfte, falls überhaupt Unterschiede zwischen beiden Gebäudeachsen bestehen, bezüglich der Komponentenbeanspruchungen aufgrund der Steifigkeitsverhältnisse des Gebäudes der ungünstigere Fall sein. Als Bezugsachse für Massen und Steifigkeiten wurde vereinfachend, aber im Rahmen des sonstigen Genauigkeitsgrades ausreichend genau die Gebäudemittelachse gewählt.

Die Berechnungen erfolgten jeweils für den oberen und unteren Grenzwert des dynamischen Schubmoduls des Baugrundes entsprechend Kapitel A.3, also für

- $G_{\text{dyn}} = 93 \text{ MN/m}^2$ und
- $G_{\text{dyn}} = 430 \text{ MN/m}^2$.

Als modale Dämpfungen wurden, wie in Kap. A.3 vorgegeben, beim steifen Boden für alle Frequenzen einheitlich 5 % angesetzt, beim weichen Boden jedoch abweichend für die 1. Eigenform 8 %, sonst ebenfalls 5 %. (Diese niedrig angesetzten modalen Dämpfungen erscheinen den Verfassern im Vergleich mit der heutigen Auslegungspraxis sehr konservativ.)

Die errechneten globalen Schnittgrößen lassen erkennen, daß ein Versagen des Schaltanlagegebäudes als Gesamttragwerk unter 2-fachem Sicherheitserdbeben praktisch auszuschließen ist.

Zur Beurteilung der Erdbebenbeanspruchung der Batterien und Schaltschränke, die sich nach /1/ auf den Bühnen $\pm 0,00$ m und $+ 4,50$ m befinden, sind in den Bildern 1.3.1 bis 1.3.4 die ermittelten Etagenantwortspektren angegeben, und zwar jeweils für beide dynamische Schubmoduli des Baugrundes. Die Anwendung der Spektren hat wie üblich zu erfolgen, d.h. unter Festlegung geeigneter einhüllender Spektren für die Komponentenauslegung.

Schrifttum

- /1/ Vereinigte Elektrizitätswerke Westfalen AG:
1160 MWe-HTR-Demonstrationskernkraftwerk,
Sicherheitsbericht, Stand April 1974

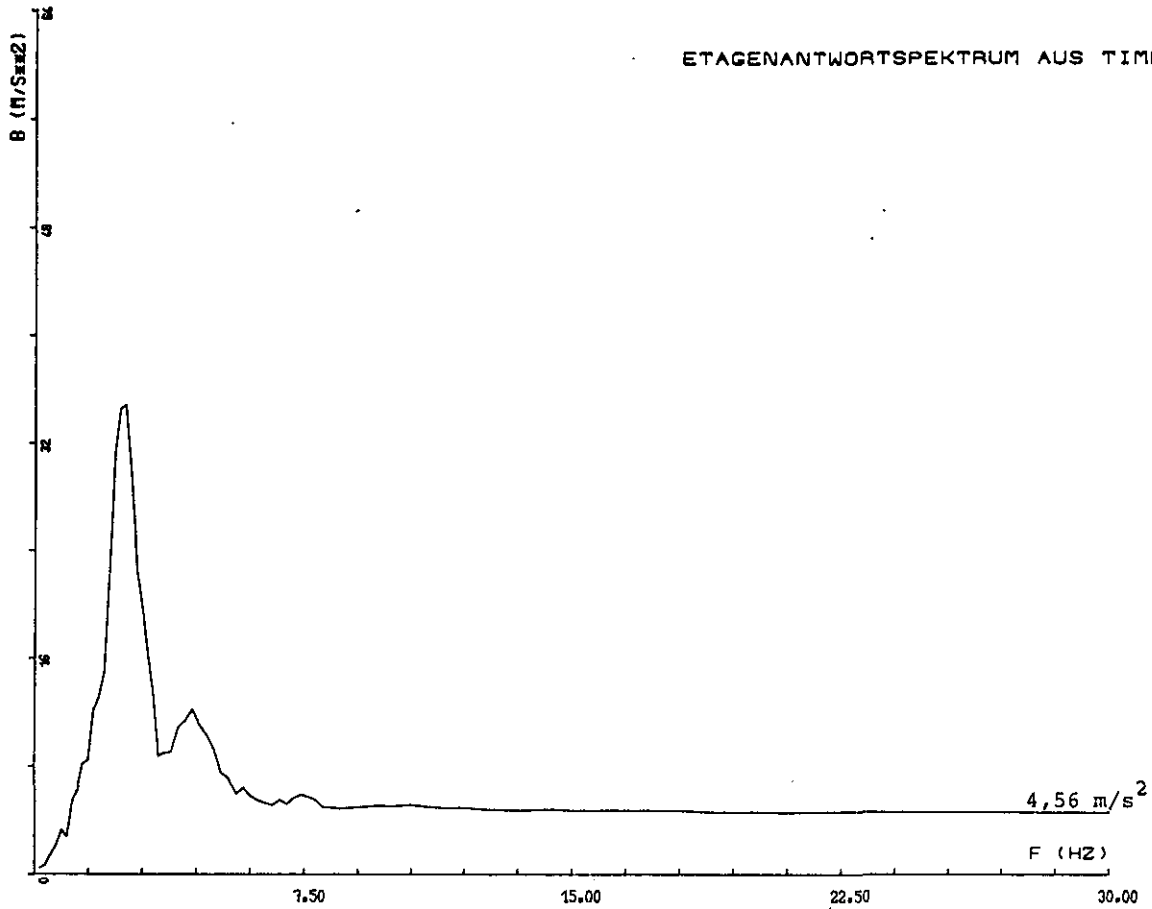


Bild 1.3.1 HTR SCHALTANLAGENGEBÄUDE, 0.0 M , G= 93 MN/M**2
DOF 7 DAE = 0.02

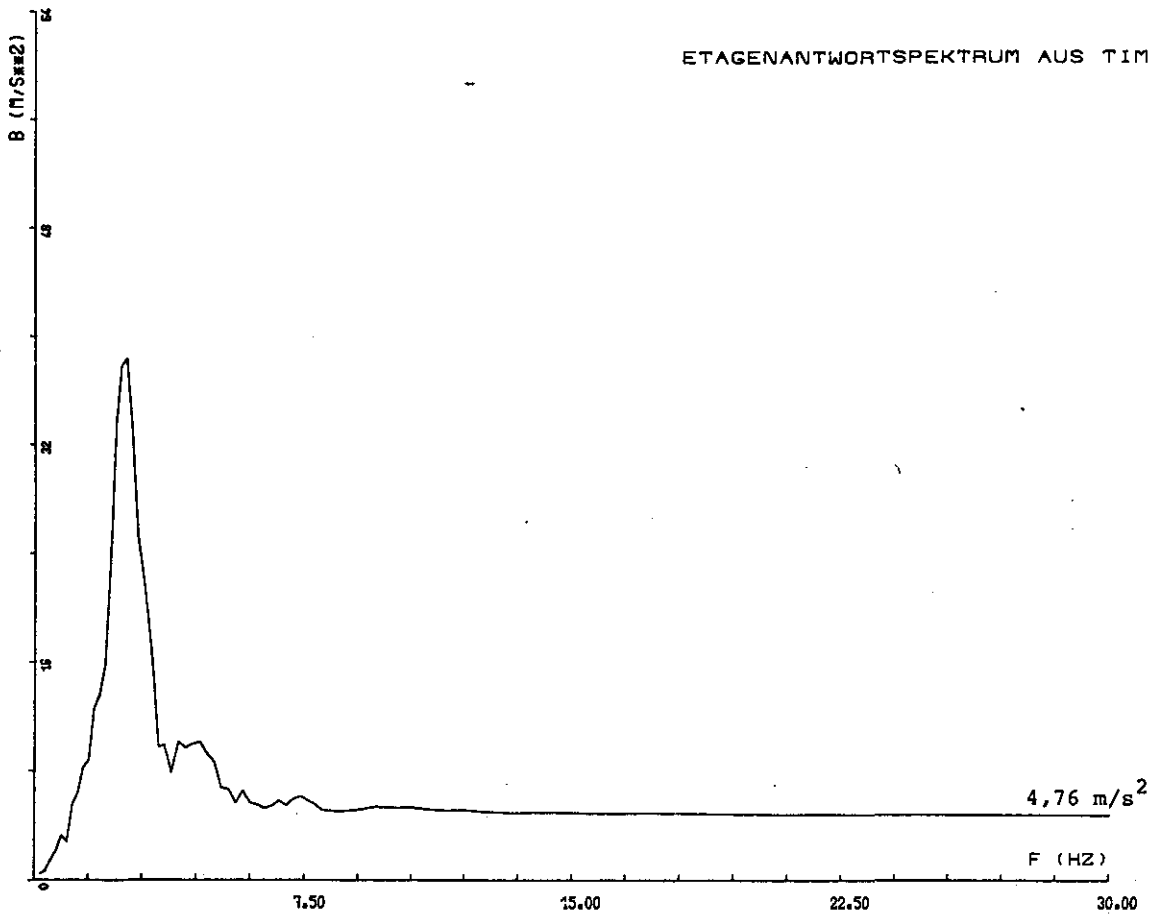


Bild 1.3.2 HTR SCHALTANLAGENGEBÄUDE, +4.5 M , G= 93 MN/M**2
DOF 5 DAE = 0.02

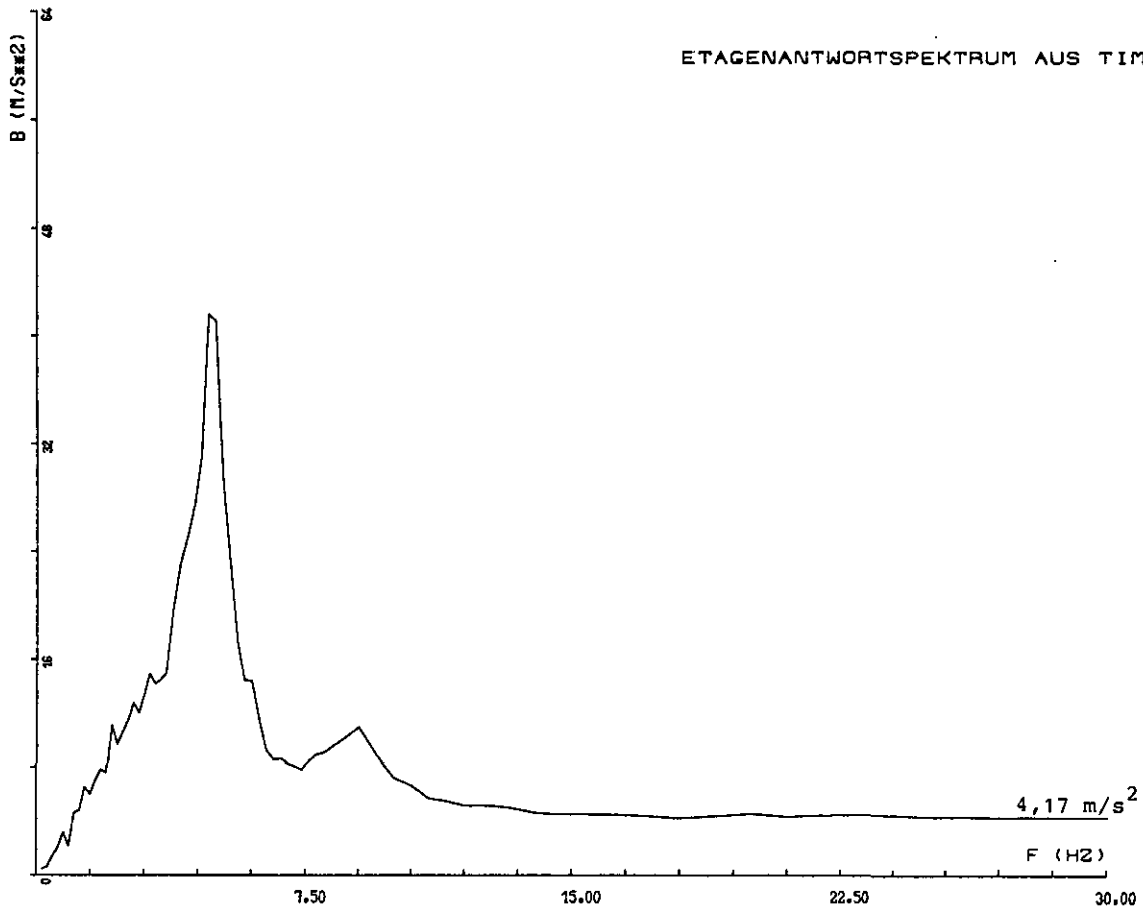


Bild 1.3.3 HTR SCHALTANLAGENGEBÄUDE, 0.0 M , G=430 MN/M**2
DOF 7 DAE = 0.02

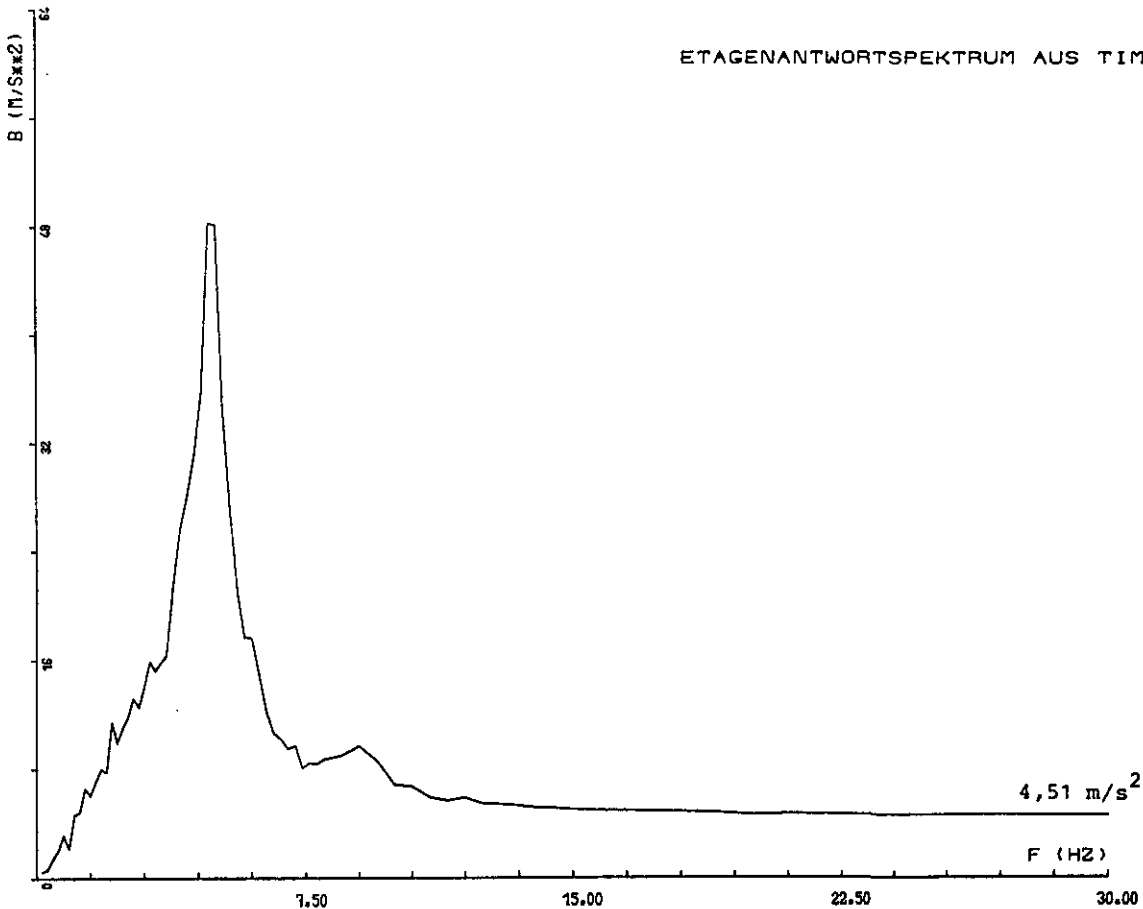


Bild 1.3.4 HTR SCHALTANLAGENGEBÄUDE, +4.5 M , G=430 MN/M**2
DOF 5 DAE = 0.02

1. EINLEITUNG

1.1 Problemstellung

Das Ziel der probabilistischen Sicherheitsstudie für Hochtemperaturreaktoren in der Phase Ib ist die Ermittlung von Risikowerten, die durch Störfälle bei einem geplanten Kernkraftwerk mit Hochtemperaturreaktor (HTR-1160 der Hochtemperatur-Reaktorbau GmbH als Referenzanlage) an einem Standort in der Bundesrepublik Deutschland hervorgerufen würden. In der Phase Ib, die sich generell mit der Übertragbarkeit der Ergebnisse der AIPA-Studie /1/ auf deutsche Verhältnisse befaßt, sollten bei den betrachteten Störfällen auch Einwirkungen von außen als auslösende Ereignisse mit einbezogen werden. Da in der AIPA-Studie nur das auslösende Ereignis "Erdbeben" einer näheren Analyse unterzogen wurde, wurde es als notwendig erkannt, die anderen möglichen äußeren Einwirkungen, zumindest in einer Grobabschätzung, auf ihren Risikobeitrag hin zu untersuchen. Der vorliegende Arbeitsbericht gibt die Ergebnisse dieser Untersuchungen wieder.

Als auslösende Ereignisse werden betrachtet:

- Unwetter,
- extreme Wasserstände,
- Flugzeugabsturz,
- Explosionsdruckwelle,
- schädliche Stoffe,
- mechanische Einwirkungen aufgrund des Versagens von Sekundärkreiskomponenten.

Die Problematik der Sabotage und der mögliche Risikobeitrag, der sich durch Störmaßnahmen Dritter ergeben kann, werden wie in der Deutsche Risikostudie auch in dieser Studie nicht betrachtet.

Die Referenzanlage für diese Studie sollte entsprechend geltenden Richtlinien und Kriterien, zum Beispiel /3/ für Leichtwasserreaktoren, gegen äußere Einwirkungen ausgelegt werden. Im Rahmen des Genehmigungsverfahrens für die HTR-1160-Anlage wurde diese

Auslegung vom Konzept her einer Begutachtung unterzogen. Dabei wurden Schwachstellen erkannt und anhand von Gutachtensbedingungen Verbesserungen gefordert. Mit den Untersuchungen wurden diese Verbesserungen mit berücksichtigt.

1.2 Vorgehensweise

Die Untersuchungen zu Einwirkungen von außen erfordern eine eingehende Betrachtung des Standortes, da diese Ereignisse sowohl hinsichtlich ihrer Eintrittshäufigkeit als auch der möglichen Belastungen standortabhängig sein können. Um eine standortunabhängige Aussage zu erhalten, müßte man mehrere Standorte in die Untersuchung einbeziehen; hierzu ist ein großer Aufwand erforderlich, der den Rahmen dieser Studie übersteigt. Für die Untersuchungen in dieser Studie wurde der Standort der Referenzanlage Hamm-Schmehausen zugrunde gelegt. Hamm-Schmehausen zeichnet sich bezüglich der äußeren Einwirkungen weder als besonders gefährdeter noch als besonders geschützter Standort aus. Für die Eintrittshäufigkeit von Explosionsdruckwellen wurden besondere Annahmen getroffen.

In Kapitel 2 werden die durchgeführten Arbeiten jeweils für die Einzelphänomene beschrieben. Die Vorgehensweise orientiert sich dabei im allgemeinen an folgendem Schema:

1. Aufzeigen der Standortsituation
2. Ermittlung der Eintrittshäufigkeit für das auslösende Ereignis
3. Aufzeigen der vorgesehenen Schutzmaßnahmen.
4. Abschätzen der Risikorelevanz. Dazu wird
 - a) davon ausgegangen, daß bei den gegen die jeweiligen Einwirkungen geschützten Anlagenteilen kein kausales Versagen als Folgeereignis eintritt. Die systemtechnische Beherrschung des Störfalls hängt damit nur von der Zuverlässigkeit der Systeme ab. Die Ausfallhäufigkeit für diese System oder Anlagenteile ist dementsprechend wesentlich geringer als die Eintrittshäufigkeit des auslösenden Ereignisses.

- b) bei den nicht gegen die jeweiligen Einwirkungen geschützten Anlagenteilen ohne weitergehende Untersuchungen eine Zerstörung oder ein Versagen angenommen. Es wird untersucht, welche Ereignisabläufe zu erwarten sind und wie risikorelevant diese sind. Dazu wird die Häufigkeit mit der Häufigkeit für vergleichbare Ereignisabläufe aus anlageninternen Störfällen verglichen.
- c) untersucht, ob die bei der Auslegung berücksichtigten Lastannahmen überschritten werden können und mit welcher Häufigkeit dies gegebenenfalls zu erwarten ist. Dabei kann es notwendig werden, die Wahrscheinlichkeit von Folgeereignissen zu diskutieren.

2. UNTERSUCHUNGEN ZU DEN EINZELPHÄNOMENEN

2.1 Naturbedingte Einwirkungen (außer Erdbeben)

2.1.1 U n w e t t e r

Eine Gefährdung der Anlage kann ausgehen von extremen Windlasten, umherfliegenden Gegenständen - wie Gebäudetrümmer, losgelöste Teile der elektrischen Schalteinrichtungen auf dem Gelände, Fahrzeuge - und den möglichen Folgen von Blitzeinschlägen. Aufgrund ihrer unterschiedlichen Wirkung werden die auslösenden Ereignisse Sturm und Blitzschlag getrennt untersucht.

Sturm

Da für den Standort keine verbindlichen Wetterbeobachtungen und Messungen vorliegen, wurde auf Auswertungen von in der Nähe befindlichen Wetterstationen zurückgegriffen. Aufgrund der ungestörten geographischen Gegebenheiten am Standort und in der weiteren Umgebung ist eine Übernahme der Daten der Wetterstation Ostinghausen (ca. 15 km) und der Wetterstationen in Essen und Düsseldorf ohne weiteres möglich.

Mittlere Windgeschwindigkeiten in den einzelnen Sektoren nach Jahreszeiten

	N	NO	O	SO	S	SW	W	N	Gesamt
Frühjahr	2,3	3,1	3,1	2,1	4,1	6,1	5,0	3,1	3,9 m/s
Sommer	1,9	2,5	2,1	2,1	2,6	5,3	4,5	3,0	3,5 m/s
Herbst	2,1	3,0	2,1	2,3	4,4	6,3	4,3	2,4	3,7 m/s
Winter	2,4	3,2	2,6	2,5	4,2	6,3	5,2	3,3	4,1 m/s
Jahr	2,2	3,0	2,5	2,3	4,1	6,0	4,8	3,0	3,8 m/s

40 bis 50 % aller Winde wehen aus dem Südwestquadranten. Daneben sind die Winde aus Osten mit 15 bis 18 % im Winterhalbjahr und weniger als 10 % im Sommer noch zu erwähnen. Die übrigen Windrichtungen spielen nur eine untergeordnete Rolle.

Im Zusammenhang mit einer Gefährdung durch extreme Windlasten sind in Abhängigkeit von den Bauwerkshöhen die maximal zu erwartenden Windgeschwindigkeiten von Bedeutung. In Bild 1 werden Überschreitungshäufigkeiten von Tagesmaxima der Windgeschwindigkeiten angegeben /4/. Unterschiedlich exponierte Landschaftsgebiete der Bundesrepublik Deutschland sind dabei den Kurven I bis V zugeordnet. Der Standort Hamm-Schmehausen kann als "mäßig bis durchschnittlich exponierter Ort" angesehen werden; entsprechend erfolgt eine Zuordnung zur Kurve IV.

Alle Gebäude eines Kernkraftwerks werden entsprechend den baulichen Vorschriften gegen Windlasten ausgelegt. Die Auslegung erfolgt nach DIN 1055. Für Gebäudehöhen zwischen 8 bis 20 m werden in dieser Norm Windgeschwindigkeiten von 35,8 m/s zugrunde gelegt. Die mittlere jährliche Zahl der Tage mit Windspitzen, die größer oder gleich Auslegung nach DIN 1055 sind, liegt nach Bild 1 Kurve IV demnach bei 0,055 (einmal in 20 Jahren).

Gemessene maximale Windgeschwindigkeiten liegen für die Stationen Essen und Düsseldorf vor /4/.

Essen: Maximalwert 42 m/s (Orkan vom 13.11.1972: 32 m/s)
Düsseldorf: Maximalwert 33 m/s

Die Werte sind bezogen auf eine Gebäudehöhe von 15 m. Im Vergleich zur DIN 1055 (Gebäudehöhe 8 bis 20 m mit 35,8 m/s) ergibt sich für eine Windgeschwindigkeit von 42 m/s eine Überschreitung von 18 %. Es kann aber angenommen werden, daß für die Gebäude, die gegen Explosionsdruckwellen ausgelegt sind, durch diese Auslegung auch weit größere Windlasten als nach DIN 1055 abgedeckt werden. Vergleiche der Regulatory Guide 1.76 für die Region I der USA (größte Tornadogefährdung) mit den für die Bundesrepublik Deutschland nach der BMI-Richtlinie für Explosionsdruckwellen /21/ anzunehmenden Druckbelastungen (siehe Bild 2) zeigen, daß die dynamischen Wirkungen einer Trombe (Wirbelsturm) geringer einzuschätzen sind als die einer Druckwelle aus chemischen Explosionen. Ebenso ist für die Gebäude, die gegen Flugzeugabsturz geschützt sind, keine Gefährdung durch umherfliegen-

de Gegenstände zu erwarten. Besonders empfindlich gegen umherfliegende Gegenstände sind die frei auf dem Anlagengelände angeordneten elektrischen Schalteinrichtungen und Transformatoren (Netzanschluß und Eigenbedarfsversorgung über den Generator). Als Folgeereignis bei Zerstörungen an diesen Anlagenteilen tritt der Notstromfall ein. Außer bei Einwirkungen im Bereich des Kernkraftwerks kann es natürlich auch in weiter entfernten Teilen des Netzanschlusses aufgrund von Unwetter (Sturm, Eisbildung) zu Unterbrechungen kommen, die für den Fall, daß es nicht gelingt, die Anlage auf Eigenbedarfsversorgung abzufangen, zum Notstromfall führen. Es wird daher davon ausgegangen, daß der in den Analysen zum Ereignis "Ausfall der Fremdenergie" benutzte Wert für die Häufigkeit der Anforderung des Notstromsystems diese unwetterbedingten Anforderungen mit berücksichtigt.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß aufgrund von Einwirkungen durch Sturm, obwohl selbst extreme Windlasten mit einer gegenüber anderen äußeren Einwirkungen relativ hohen Eintrittshäufigkeit auftreten können, keine Gefährdung der Anlage zu erwarten ist. Dies ist insbesondere durch die Auslegung gegen Explosionsdruckwellen und Flugzeugabsturz begründet.

Blitzschlag

Aus Bild 3 lassen sich Angaben über die mittlere Zahl von Gewittertagen für die Bundesrepublik Deutschland entnehmen. Der Standort Hamm-Schmehausen grenzt an einen Bereich mit etwas erhöhter Gewittertätigkeit (26 bis 36 Tage pro Jahr). Auf der Basis von Rechenansätzen in /5/ wurde die Häufigkeit von Erdblitzten am Standort mit 6 Einschlägen pro km² und Jahr ermittelt.

Berücksichtigt man, daß die wirksamen Anziehungsflächen in Abhängigkeit von den Bauwerksausdehnungen (insbesondere der Bauwerkshöhe) größer sind als die Gebäudegrundflächen, so lassen sich folgende Einschlaghäufigkeiten errechnen:

Abluftkamin:	$7,5 \cdot 10^{-1}/a$
Kühlturm:	2,6/a
Reaktorgebäude:	$1,1 \cdot 10^{-1}/a$

Im Konzeptgutachten zum HTR werden Blitzschutzmaßnahmen nicht angesprochen. Da allerdings alle bisher in der Bundesrepublik Deutschland errichteten Kernkraftwerke Blitzschutzeinrichtungen besitzen und diese Anlagen auch im Rahmen der Genehmigungsverfahren der Begutachtung und Prüfung unterzogen werden, wird davon ausgegangen, daß auch für den HTR eine vergleichbare Auslegung erfolgt. Trotz dieser Auslegung können nicht alle Probleme im Zusammenhang mit einem vollständigen Blitzschutz für Kernkraftwerke als gelöst betrachtet werden. Besondere HTR-spezifische Gesichtspunkte sind derzeit allerdings dabei nicht zu erkennen.

Eine probabilistische Erfassung der Schadens Erwartung, die sich an den verschiedenen Wirkungsparametern orientiert (Stromsicherheit, maximale Stromsteilheit, Stromquadratimpuls, Ladung) befindet sich erst in einem Anfangsstadium und läßt zur Zeit noch keine quantitativen Aussagen zu. Im Rahmen der Arbeiten zur Deutschen Risikostudie wurden für einen Leichtwasserreaktor Ereignisabläufe untersucht, die ausgelöst durch einen Blitzschlag zum Kernschmelzen führen können. Aufgrund grober Überlegung haben danach solche Ereignisabläufe in Anbetracht der vorhandenen Schutzmaßnahmen und Sicherheitssysteme für die Kernschmelzhäufigkeit eine vergleichsweise geringe Bedeutung. Eine quantitative Absicherung dieser Aussage wird in der Phase B der Deutschen Risikostudie angestrebt.

2.1.2 Extreme Wasserstände

Hochwasser

Das Standortgelände grenzt an die Niederungen der Lippe und stellt ein aufgeschüttetes Gelände mit einem Niveau von 66,2 m üNN dar. Nach den vorliegenden Bauzeichnungen entspricht die Gebäudekote $\pm 0,00$ m dem Geländeniveau. Türen und Zugänge zu den einzelnen Bauwerken befinden sich auf dieser Gebäudekote. Es ist geplant, die Grundwasserabdichtung bis zu $\pm 0,00$ m durchzuführen. Eine mögliche zusätzliche Abdichtung von Zugängen bzw. Öffnungen durch besondere Maßnahmen ist nicht vorgesehen.

Die amtliche Höchsthochwassermarke (HHW) im Standortbereich wird mit 65 m üNN angegeben. Dieser Wert stellt somit den höchsten beobachteten Wasserstand dar, allerdings liegen keine Angaben über den Beobachtungszeitraum vor. Lange zurückliegende Beobachtungszeiträume sind allerdings für ein Hochwasservorhersagemodell auch kaum von Bedeutung, da davon auszugehen ist, daß sich die hydrologischen Gegebenheiten geändert haben können (Flußverlauf der Lippe mit ihren Vorflutern) und zivilisationsbedingt das Rückhaltevermögen des Einzugsbereichs der Lippe sich verringert hat.

Bild 4 zeigt das Überschwemmungsgebiet der Lippe am Standort beim HHW-Stand von 65 m üNN, wobei davon auszugehen ist, daß im Bereich des Kernkraftwerks nachträglich eine Aufschüttung erfolgte. Abschätzungen zeigen, daß mit einer aufstauenden Wirkung durch den Autobahndamm aufgrund des großen möglichen Durchflußquerschnitts nicht zu rechnen ist. Die Zugänglichkeit zum Standort, auch für Fahrzeuge, ist bei diesem Wasserstand gewährleistet. Ein Erwartungswert für ein höheres Hochwasser als 65 m üNN kann derzeit nicht angegeben werden.

Die Schadens Erwartung bei einem angenommenen hochwasserbedingten Wassereinbruch wäre gekennzeichnet durch eine Überflutung des Reaktorschutzgebäudes, des Reaktornebengebäudes, des Schaltanlagegebäudes und der in den Koten - 5,5 m; - 4,5 m und - 3,5 m bis zum Wasserspiegel liegenden Anlagenteile. An betroffenen Systemen und Komponenten wäre im wesentlichen zu nennen:

- die Personen- und Notschleuse,
- Systeme zur Notstromversorgung,
- Systeme zur externen Energieversorgung,
- Hilfskühlsysteme,
- Behälter und Aufbereitungsanlagen für aktive Stoffe.

Der vorhandene Spielraum von 1,20 m zwischen dem höchsten beobachteten Wasserstand (HHW) und der Gebäudennullkote stellt allerdings eine Reserve gegen denkbare Überschreitungen dar. Darüber hinaus kann noch berücksichtigt werden, daß aufgrund der Vorwarnzeiten und der Zugänglichkeit auch temporäre Schutzmaßnah-

men möglich sind. Weitergehende Untersuchungen mit dem Ziel, diese qualitativen Überlegungen auch quantitativ abzusichern, wurden nicht durchgeführt. Solche Untersuchungen wären einerseits nicht im vorgesehenen Rahmen der Studie durchführbar gewesen, andererseits sind sie auch insofern wenig sinnvoll, als bei einer neuen Anlage die Auslegungsanforderungen entsprechend der derzeit in Arbeit befindlichen KTA-Regel 2207 Berücksichtigung finden würden. Die Forderungen der KTA-Regel gehen von einem probabilistischen Konzept aus.

Niedrigwasser

Maßgebend für die benötigte Kühlwassermenge ist die erforderliche Zusatzwassermenge für die Verdunstungskühler des Nebenkühlwassersystems und die Abschlammwassermenge der Hilfskühlsysteme zur Nachwärmeabfuhr.

Insgesamt werden $0,082 \text{ m}^3/\text{s}$ ($0,065$ bzw. $0,017 \text{ m}^3/\text{s}$) aus den Einlaufwerken bzw. aus den Vollentsalzungswerken benachbarter Kraftwerke bezogen. Diese Menge stellt unter sicherheitstechnischen Gesichtspunkten eine Maximalmenge dar. Die benachbarten Kraftwer-

Kanal. Die niedrigste beobachtete Wasserführung der Lippe beträgt $2,77 \text{ m}^3/\text{s}$. Der Datteln-Hamm-Kanal erhält im Standortbereich sein Verlustwasser durch Pumpenförderung entlang der Streckenführung (an den Schleusen). Der Streckenabschnitt bis zur nächsten Schleuse kann unter sicherheitstechnischen Gesichtspunkten als Wasserreservoir betrachtet werden. Selbst wenn man als weiteren potentiellen Wasserverbraucher zusätzlich noch den THTR mit $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ berücksichtigt, ist ein Aspekt "Niedrigwasser" für die hier angestellten Risikobetrachtungen ohne Bedeutung.

2.2 Zivilisationsbedingte Einwirkungen

2.2.1 Flugzeugabsturz

Die Untersuchungen gliedern sich auf nach

- a) Zivilluftverkehr,
- b) Militärluftverkehr.

Standortsituation:

Der Standort liegt:

- a) - ca. 16,5 km östlich der Flugverkehrsstrecke B1
 - ca. 17 km südöstlich der Flugverkehrsstrecke R15 und der Flugverkehrberatungsstrecke UR15
 - ca. 24 km südöstlich der Flugverkehrsstrecke B29
 - ca. 10 km östlich der Flugverkehrsstrecke B5
 - unterhalb der Flugverkehrberatungsstrecke UB5
 - ca. 11 km östlich des Zivilflugplatzes Hamm-Lippewiesen
 - ca. 23 km nordöstlich des Zivilflugplatzes Neheim-Hüsten
- b) - unterhalb des Sektors C des militärischen Nahverkehrsbezirks Gütersloh
 - unterhalb des militärischen Tagestiefflugsystems LOW 500, das in einer Minimumhöhe von 155 m über Grund befliegen wird und praktisch die gesamte Bundesrepublik Deutschland überdeckt
 - unterhalb einer in Ost-West-Richtung verlaufenden Nacht-tiefflugstrecke 2400, die in einer Höhe von 745 m befliegen wird
 - ca. 12 km nordwestlich des Militärflugplatzes Werl
 - ca. 35 km nordöstlich des Militärflugplatzes Gütersloh

Sowohl für die Zivil- als auch für die Militärflugzeuge zeigt die Statistik eine erhöhte Absturzhäufigkeit in der Start- und Landephase. Die Ergebnisse verschiedener Untersuchungen lassen jedoch erkennen, daß für Entfernungen größer als 10 km von einem Flugplatz der Einfluß vernachlässigbar gering wird.

Dementsprechend sind die nächstgelegenen Flugplätze "Hamm-Lippewiesen" und "Werl" unter diesem Aspekt nicht von Bedeutung.

Probabilistische Abschätzungen:

Zu a)

Mit Ausnahme von Sportflugzeugen, welche nach Sichtflugregeln fliegen, konzentriert sich der Zivilflugverkehr auf Flugverkehrsleitlinien. Mit /6/ liegen die neuesten Daten über die Beflie-

gungsraten der Flugverkehrsstrecken für den Raum Hamm vor. In Anlehnung an Rechenmodelle in /22/ wurde die Eintrittshäufigkeit für den Absturz eines größeren Zivilflugzeugs (Jet) am Standort abgeschätzt.

Berechnungsbasis:

Die Flugverkehrsstrecke führt direkt über den Standort. Für die Abhängigkeit der Auftreffhäufigkeiten von der Entfernung zur Flugverkehrsstrecke wird eine Normalverteilung mit einer zur Flugverkehrsstrecke von $\sigma = 9$ km angenommen.

Befliegungsrate der Flugverkehrs-
strecke:

27 740/a

Spezifische Absturzhäufigkeit:

$2,5 \times 10^{-12}$ Abstürze pro
Flugkilometer und Flug

Es ergibt sich eine Absturzhäufigkeit, bezogen auf eine relevante Kernkraftwerksfläche, von 100×100 m von 6×10^{-11} /a.

Zur Abschätzung einer möglichen Gefährdung durch Sportflugzeuge wurde entsprechend einem Ansatz in /7/ der Flugverkehr auf den

für den Standort läßt sich danach aus der Anzahl der Start- und Landevorgänge und der Entfernung Standort - Flughafen ableiten. Nimmt man aufgrund fehlender Daten für den Flugplatz Hamm-Lippe-wiesen konservativ einen Wert 10.000 Flugbewegungen/a an, so ergibt sich insgesamt für Sportflugzeuge am Standort eine Absturzhäufigkeit kleiner 10^{-7} /a.

Zu b)

Der Standort liegt außerhalb von einschränkenden Flugverkehrszonen (wie ATZ, PZ, erhöhte Flugverkehrsdichte). Die Angabe, daß er unterhalb des Sektors C des militärischen Nahverkehrsbereichs Gütersloh liegt, stellt keine verschärfende Situation dar. Eine exakte probabilistische Erfassung des Ereignisses "Absturz eines Militärflugzeugs an einem bestimmten Standort" mit Angabe einer Verteilungsfunktion für die Absturzhäufigkeit ist im allgemeinen nicht durchführbar, da die Ereignisse durch vielfältige Randbedingungen (Flugstundenplanung, Flugzeugtypeneinsatz, unter-

schiedliche Wartungsbedingungen, wechselnde Übungsbedingungen usw.) geprägt werden.

Mit Ausnahme des Nachttiefflugverkehrs, der auf festgelegten Leitlinien stattfindet, lassen sich für den übrigen militärischen Luftverkehr keine festgelegten Routen angeben.

Es gibt zwar neben dem freifliegenden Flugverkehr auch einen Leitlinienverkehr, der durch die militärische Flugsicherung überwacht wird. Die Streckenführung unterliegt jedoch einer fortlaufenden Neufestlegung. Demzufolge besteht für die Absturzhäufigkeit zumindest derzeit keine Ortsabhängigkeit. Dem entspricht auch die beobachtete Verteilung der Absturzorte, die keine signifikante lokale Häufung erkennen läßt.

Für die nachfolgenden Rechnungen wurde deshalb eine spezifische Absturzhäufigkeit von $10^{-10} \frac{\text{Abstürze}}{\text{a m}^2}$ zugrunde gelegt. Diese Abschätzung aus /23/ basiert auf statistischen Daten aus den Jahren um 1970. Obwohl sich die Absturzhäufigkeit zwischenzeitlich geringfügig verringert hat, stellt der obengenannte Wert auch heute noch eine vernünftige Annahme dar, da die Streubreite für ein Vorhersagemodell praktisch nicht angegeben werden kann.

Berücksichtigt man in erster Näherung eine relevante Kernkraftwerksfläche von 10^4 m^2 , so ergibt sich eine Absturzwahrscheinlichkeit auf diese Fläche von $10^{-6}/\text{a}$.

Um unabhängig von dieser Betrachtung den Einfluß der über den Standort verlaufenden Nachttiefflugstrecke zu erfassen, wurde anhand von vorliegenden Daten eine Rechnung durchgeführt, die, wieder auf der Basis einer normalverteilten Absturzdichte um eine Leitlinie, eine Absturzhäufigkeit auf eine relevante Fläche von $100 \cdot 100 \text{ m}$ von kleiner $4 \times 10^{-7}/\text{a}$ ergibt.

Um die Konsequenzen eines Flugzeugabsturzes für das Kernkraftwerk zu ermitteln, wurden die Auftreffhäufigkeiten für die einzelnen Gebäude ermittelt.

Randbedingungen:

- Spezifische Absturzhäufigkeit $10^{-10}/\text{m}^2$,
- Absturzwinkel = 45° ,
- Mittelwertbildung über 4 (orthogonale) Absturzrichtungen,
- Berücksichtigung von Abschattungen durch andere Gebäude,
- keine Berücksichtigung von Abschattungen durch Kühltürme.

Auftreffhäufigkeiten:

Reaktorschutzgebäude	$3,7 \cdot 10^{-7}/\text{a}$
Reaktornebengebäude	$3,2 \cdot 10^{-7}/\text{a}$
Maschinenhaus	$3,7 \cdot 10^{-7}/\text{a}$
Schaltanlagegebäude	$5,2 \cdot 10^{-7}/\text{a}$

Die Berechnung einer Auftreffhäufigkeit für das Reaktorhilfsgebäude ist aufgrund seiner Lage schwierig. Es kann aber davon ausgegangen werden, daß sich diese Auftreffhäufigkeit in der gleichen Größenordnung wie die anderen angegebenen Werte bewegt.

~~Das Schutzkonzept gegen Flugzeugabsturz sieht vor, folgende Gebäude oder Anlagenteile~~

- a) durch bauliche Maßnahmen gegen einen direkten Aufprall zu schützen
 - Reaktorschutzgebäude,
 - den Teil des Kraftwerkshilfsgebäudes, der sich unterhalb der Kote $\pm 0,00$ m befindet,
 - alle Gebäudeteile des Schaltanlagegebäudes, in denen die Komponenten der Notstromversorgung und die Notsteuerstellen untergebracht sind,
 - Teile des Reaktornebengebäudes.
- b) durch räumliche Anordnung gegen eine vollständige Zerstörung zu schützen
 - die Zellenkühltürme des Hilfskühlsystems mit ihren Rohr- und Kabelverbindungen.

Für diese Anlagenteile erfolgt eine Auslegung gegen Flugzeug-

Dieses aufgezeigte Schutzkonzept geht über das in /9/ beschriebene Schutzkonzept hinaus und berücksichtigt zusätzlich Gutachtensbedingungen (GB) aus dem Konzeptgutachten des RWTÜV Essen /8/. Bei der Auslegungsbeurteilung wurde die Erfüllung der Gutachtensbedingungen vorausgesetzt.

Als Belastungsfunktion bei einer Direkteinwirkung wird das in /3/ aufgezeigte Stoßlast-Zeit-Diagramm (siehe auch Bild 5) zugrunde gelegt, wobei einerseits unter Berücksichtigung der Eintrittshäufigkeit dieser Lastfall einen Extremfall darstellt, andererseits die verschiedenen möglichen Lastfälle mit einer sinnvollen Verteilungsfunktion praktisch nicht zu erfassen sind.

Für das Auftreffen von Wrackteilen, wie Triebwerk, Teile von Tragflächen oder Leitwerk, wurden bisher noch keine Belastungsfunktionen festgelegt. Nach /10/ kann die in Bild 6 aufgezeigte Funktion herangezogen werden. Legt man die gleichen Randbedingungen wie in den Untersuchungen in /11/ zugrunde, errechnet sich die Auftreffhäufigkeit eines Wrackteils auf einen Zellenkühlturm zu $1,3 \cdot 10^{-7}/a$.

Für die Naßkühler, die zum Hilfskühlsystem "Linerkühlung und Brennelementlagerkühlung" gehören, ist kein Schutz vorgesehen. Unterstellt man einen Ausfall bei Einwirkung von bedeutenden Wrackteilen, beträgt die Ausfallhäufigkeit $1,6 \cdot 10^{-7}/a$. Beherrschbar ist dieser Ausfall mit dem vorgesehenen Noteinspeisesystem. Dieses System, welches in den vorliegenden Unterlagen vom Konzept her nur andeutungsweise beschrieben wird, fördert im Einsatzfall Kühlwasser von benachbarten Kraftwerken in das betroffene Hilfskühlsystem. Im Bereich des HTR ist eine Auslegung gegen Wrackteile vorgesehen. Obwohl bei einem Flugzeugabsturz am Standort davon auszugehen ist, daß mehr oder weniger alle Kraftwerke durch Wrackteile beeinträchtigt werden, ist der Aspekt "Mehrfachtreffer" im Zusammenhang mit diesem Notspeisesystem für Risikobetrachtungen praktisch ohne Bedeutung.

Über die detaillierte Anordnung der Systeme, über die Lage von Rohrleitungen und Kabelkanälen und über den Umfang der gegen

induzierte Erschütterungen geschützten Komponenten liegen keine Angaben vor. Insofern kann eine weitergehende Analyse möglicher Ereignisabläufe nicht erfolgen. Die Überlegungen gehen davon aus, daß bei einem Flugzeugabsturz das dagegen ausgelegte Reaktorschutzgebäude den Belastungen standhält und die ebenfalls geschützten Sicherheitssysteme nicht als Folge des Ereignisses versagen. Diese Annahme stützt sich auf eine Auslegung, welche auch die bei der Begutachtung erhobenen Forderungen berücksichtigt. Es wird allerdings konservativ unterstellt, daß bei Zerstörungen der Frischdampf- oder Zwischenüberhitzerleitungen im Bereich der Rohrleitungsdurchführungen die Dichtheit des Reaktorschutzgebäudes nicht mehr gewahrt ist.

Ereignisabläufe, die sich aus der Zerstörung von nicht ausgelegten Bereichen des Kernkraftwerks (Fremdenergie- und Eigenbedarfsversorgung, Anlagen im Maschinenhaus u.a.) ergeben, sind bezüglich der dominierenden Störfallsequenzen mit Häufigkeiten behaftet, die um mehrere Größenordnungen kleiner sind als bei internen Störfällen. Konzentriert man sich auf die Kernaufheizung als relevantes Folgeereignis, so lassen sich bei Ereignisabläufen

- Absturz auf das Maschinenhaus oder Absturz auf den nicht geschützten Teil des Schaltanlagegebäudes. Es erfolgt Ausfall der Energieversorgung und des Hauptkühlsystems.
- Absturz auf das Maschinenhaus in der Nähe der ins Reaktorgebäude führenden Dampfleitungen mit Verlust der Dichtigkeit des Reaktorschutzgebäudes. Auch in diesem Fall wird konservativ der Ausfall der Energieversorgung aufgrund von Wrackteileinwirkungen oder Brand angenommen.

Beide Fälle sind in ihrem Ablauf von den Systembedingungen her vergleichbar mit dem Notstromfall. Der erste Fall führt mit einer Häufigkeit kleiner als 10^{-8} /Reaktor-Jahr zur Kernaufheizung mit Ausfall des Linerkühlsystems. Zieht man anlageninterne Störfälle zum Vergleich heran, so sind diese um Größenordnungen wahrscheinlicher (Notstromfall mit Ausfall der Nachwärmeabfuhr und Linerkühlung ca. 10^{-5} /Reaktor-Jahr), auch wenn höhere Unsicher-

heiten in den Annahmen zu berücksichtigen sind. Ähnliches gilt für den zweiten Fall, der sich vom ersten dadurch unterscheidet, daß die Dichtigkeit des Reaktorschutzgebäudes nicht gegeben ist. Die unter dieser Bedingung zu erwartende Häufigkeit für die Kernaufheizung mit Versagen des Linerkühlsystems ist kleiner 10^{-9} /Reaktor-Jahr. Vergleicht man diesen Wert mit der Häufigkeit der entsprechenden Ereigniskette beim Notstromfall, so ergeben sich auch hier um Größenordnungen kleinere Häufigkeitswerte.

In die Risikobetrachtungen mit einzubeziehen ist der Aspekt einer möglichen Umgebungsgefährdung bei Zerstörungen im Reaktor-nebengebäude. Betroffen sind hier unter anderem das Brennelement-, Reflektorelement- und Steuerstablager sowie Aktivgas-, Speicherungs-, Verdichtungs- und Aufbereitungsanlagen. Auf der Bühne 29,50 m findet der relativ langzeitige Brennelementwechsel statt, wobei Schleuse und Materialtor zum benachbarten Reaktorschutzgebäude geöffnet werden.

Die Auslegungsforderung aus den Gutachtensbedingungen werden im Rahmen dieser Arbeiten dahingehend interpretiert, daß für die Brennelement-, Reflektorelement- und Steuerstablager ein Schutz gegen Flugzeugabsturz gegeben ist. Weitergehende Untersuchungen zur Aktivitätsfreisetzung aus diesen Anlagenteilen erübrigen sich damit. Eine Abschätzung sonstiger Freisetzungen aus dem Reaktor-nebengebäude anhand von /1/ und /12/ läßt keine Risiko-beiträge erkennen.

Die Häufigkeit dafür, daß ein Flugzeugabsturz auf das Reaktor-nebengebäude in der Phase des Brennelementwechsels stattfindet, kann, ausgehend von der vorgenannten mittleren Auftreffhäufigkeit für dieses Gebäude, mit $1 \cdot 10^{-8}$ /a abgeschätzt werden. Bedenkt man, daß die Anlage sich in einem abgeschalteten Zustand befindet und mögliche Freisetzungen sich nur aufgrund von Beschädigungen an einem Brennelement ergeben können, hat dieser Aspekt für Risikobetrachtungen keine Bedeutung.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß ein Flugzeugabsturz auf das Kernkraftwerk mit Lastannahmen, wie sie der Auslegung zugrunde liegen, aufgrund der geringen Eintrittshäufig-

keit und der Auslegung gegen dieses Ereignis keinen relevanten Risikobeitrag ergibt. Im weiteren ist deshalb zu diskutieren, ob ein Flugzeugabsturz auch zu Belastungen führen kann, die über den Auslegungslastannahmen liegen und mit welcher Häufigkeit gegebenenfalls solche Ereignisse behaftet sind.

Die in den RSK-Richtlinien aufgezeigte Belastungsfunktion für einen Flugzeugabsturz deckt ein weites Spektrum möglicher Flugzeugtypen unter verschiedenen Aufprallbedingungen ab. Für Militärflugzeuge ergeben sich die maximal anzunehmenden Belastungen aus dem Absturz eines Flugzeugs vom Typ "Phantom". Als Absturzgeschwindigkeit wurde 215 m/s angenommen. Obwohl auch höhere Absturzgeschwindigkeiten denkbar sind, lassen die Unfallauswertungen erkennen, daß mit dieser Festlegung auch extreme Aufprallsituationen erfaßt werden. Eine Tendenz, neue Militärflugzeuge zu entwickeln bzw. in der Bundesrepublik Deutschland zu stationieren, die zu höheren Lastannahmen Anlaß geben, besteht nicht.

Auch ein großer Anteil von Zivilflugzeugtypen ist bezüglich der Belastungsfunktionen abgedeckt. Neben Sportflugzeugen, Kurz- und Streckenmaschinen bis zu einem Startgewicht von ca. 150 Mp. Aber auch darüber hinaus sind Großraumflugzeuge der letzten Generation (Startgewicht bis 353 Mp) bezüglich der wahrscheinlichen Absturzsituationen (Trudeln, teilweises Zerlegen in der Luft) noch mit dem angegebenen Belastungsdiagramm zu erfassen. Unter Berücksichtigung der angegebenen Abschätzung für die Absturzwahrscheinlichkeit von Zivilflugzeugen von $6 \cdot 10^{-11}/a$ sind die Fälle, die zu einer Überschreitung der Belastungsfunktion führen, in ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit noch wesentlich geringer.

2.2.2 Explosionsdruckwelle

Im Zusammenhang mit der Ermittlung der Eintrittshäufigkeit für das Auftreten von Explosionsdruckwellen wird kurz die Standort-situation aufgezeigt.

Als potentielle Gefahrenquellen sind entsprechende Industriebetriebe oder aber im Hinblick auf Unfälle beim Transport explosibler Stoffe, insbesondere Flüssiggas, Verkehrswege (Straßen, Eisenbahn, Schifffahrtswege) zu nennen.

a) Industriebetriebe

Der Nahbereich des Standortes wird vorwiegend landwirtschaftlich genutzt.

In unmittelbarer Nachbarschaft befindet sich ein weiteres Kernkraftwerk (THTR) und zwei konventionelle Kraftwerksblöcke. Unter dem hier zu betrachtenden Aspekt stellen lediglich die konventionellen Blöcke insofern eine mögliche Gefahrenquelle dar, als dort mit Kohlestaubexplosionen zu rechnen ist. Unfallbeobachtungen solcher Ereignisse, die in der Vergangenheit bei konventionellen Kraftwerken schon öfters vorgekommen sind, haben aber gezeigt, daß die Auswirkungen sich auf die unmittelbare Umgebung beschränken.

Von denen in der Umgebung befindlichen Industriebetrieben sind nur zwei von Interesse:

- Ytong AG, Werk Uentrop
ca. 2 km entfernt (chemische Industrie)
- Du Pont de Nemours, Uentrop
ca. 1,8 km entfernt (chemische Industrie)

Die Aspekte einer möglichen Gefährdung der HTR-Anlage wurden im Rahmen des Konzeptgutachtens eingehend untersucht, wobei festgestellt wurde, daß aufgrund der in den chemischen Anlagen gelagerten Mengen explosibler Stoffe (Chemikalien, Flüssiggase u.a.) und der Abstände zum Kernkraftwerk keine Gefährdungsrelevanz erkennbar ist.

b) Verkehrswege

Straßen

Nordöstlich des Standortes in ca. 250 m Entfernung die Landesstraße 1. Ordnung 736 (Lünen - Hamm - Soest)

(3050 Kfz/24 h mit 32 % Lkw-Anteil, über den Anteil von Flüssiggastransporten liegen keine Angaben vor).

Nordwestlich des Standortes in ca. 500 m Entfernung die Autobahn E 73 Dortmund - Hannover

(32209 Kfz/24 h mit 24 % Lkw-Anteil, über den Anteil von Transporten mit explosiblen Stoffen gibt es keine Angaben).

Bahn

Bundesbahnhauptstrecken führen im Abstand von 7 bzw. 10 km Entfernung vom Standort vorbei.

Die am Kraftwerksgelände vorbeiführende vollspurige nebenbahnähnliche Kleinbahnstrecke ist eine reine Güterverkehrsstrecke, über die Kohletransporte zu den konventionellen Kraftwerken erfolgen. In unregelmäßigen Abständen fahren Güterzüge mit Stückgut am Standort vorbei bis zur Endstation Lippborg - Hüntrop.

Schiffahrtswege

Die in ca. 750 m nordöstlich des Standortes vorbeifließende Lippe ist in diesem Abschnitt nicht schiffbar.

Auf dem Gelände im VEW-eigenen Hafen endet der Datteln-Hamm-Kanal mit 6 Schiffsanlageplätzen (ca. 500 m vom HTR-Standort). Es werden vorwiegend Kohle und Öl umgeschlagen (ca. 410 bzw. 58 Schiffe pro Jahr). Statistische Angaben über die Anzahl von Flüssiggastransporten auf dem Datteln-Hamm-Kanal liegen nicht vor. Konkrete Ausbaupläne des Kanals (bis nach Lippstadt projektiert) sind nicht bekannt.

In Anbetracht der Standortsituation ergeben sich als potentielle Freisetzungsorte für zündfähige Gas- oder Gasgemischwolken

- die vorbeiführende Landesstraße und die Autobahn,
- eventuell der Liegehafen des Datteln-Hamm-Kanals.

Da statistische Daten über das Unfallgeschehen an diesen Orten aber nicht vorliegen, läßt sich eine mögliche standortabhängige Gefährdung probabilistisch nicht erfassen. Pauschal kann aber festgestellt werden, daß für den Standort Schmehausen bezüglich

einer Gefährdung durch Explosionsdruckwellen im Vergleich zu anderen Kernkraftwerksstandorten keine besondere Gefährdung besteht. Aus diesem Grund werden für diese Studie die Eintrittshäufigkeiten für das auslösende Ereignis "Explosionsdruckwelle" aus der Deutschen Risikostudie (DRS) übernommen. Die Untersuchungen in der DRS gehen davon aus, daß eine mögliche Gefährdung für den dort untersuchten Standort Biblis im wesentlichen von Schiffstransporten auf dem Rhein ausgeht. Unter Berücksichtigung statistischer Daten über das Unfallgeschehen auf dem Mittelrhein wurde die Eintrittshäufigkeit für die der Auslegung der DRS-Referenzanlage zugrunde liegende Lastannahme ermittelt. Diese Lastannahme ist die gleiche wie sie auch der Auslegung des HTR zugrunde liegt und wie sie in Bild 7 dargestellt ist.

Nachfolgend wird kurz die Vorgehensweise zur Ermittlung der Eintrittshäufigkeit nach /11/ skizziert.

Die Eintrittshäufigkeit kann demnach durch das Produkt verschiedener Einzelwerte ausgedrückt werden.

$$W = W_1 \cdot W_2 \cdot \dots \cdot W_n$$

Je nach Betrachtungsweise können für diese Einzelhäufigkeiten bzw. Wahrscheinlichkeiten bestimmte Vorgänge herangezogen werden. In den Arbeiten in der DRS wurden folgende Einzelwerte definiert:

W_1 = Häufigkeit eines schweren Unfalls eines Flüssiggastankers

W_2 = Wahrscheinlichkeiten der Bildung eines explosionsfähigen Gas-Luft-Gemisches

W_3 = Wahrscheinlichkeit des Driftens dieser Wolke auf das Kernkraftwerk

W_4 = Wahrscheinlichkeit der Zündung dieser Wolke am Kernkraftwerk

W_5 = Wahrscheinlichkeit einer Deflagration

Die für die Abschätzung der Werte notwendigen Daten wurden aus /13/ und /14/ entnommen.

Aus den verschiedenen Statistiken ergeben sich in Abhängigkeit vom Beobachtungszeitraum relativ große Streubreiten für W_1 . Die Wahrscheinlichkeit für W_2 und W_4 sind ebenfalls mit großen Streubreiten behaftet. Demzufolge wird für die Eintrittshäufigkeit für das auslösende Ereignis "Explosionsdruckwelle" lediglich ein Bereich mit 10^{-5} bis $5 \cdot 10^{-7}/a$ angegeben /11/.

Die in Bild 7 aufgezeigte Belastungsfunktion deckt Druckwellen ab, die bei einer Deflagration gesättigter Kohlenwasserstoffe entstehen. Die Randbedingungen (Deflagrationsort, Gaswolkenmodell) wurden dabei so konservativ angenommen, daß auch bei größeren freigesetzten Gasmengen bei einer Deflagration praktisch keine höheren Druckwellen zu erwarten sind.

Ausgelegt entsprechend der angegebenen Belastungsfunktion sind bei der HTR-Referenzanlage folgende Bauwerke:

- das Reaktorschutzgebäude,
- die gleichen Bereiche des Kraftwerkhilfsgebäudes, welche auch gegen Flugzeugabsturz ausgelegt sind,
- die gleichen Bereiche des Schaltanlagegebäudes, welche auch gegen Flugzeugabsturz ausgelegt sind,
- die Zellenkühltürme des Hilfskühlsystems zur Nachwärmeabfuhr,
- das Noteinspeisesystem,
- Teile des Reaktornebengebäudes.

Bei den Risikoabschätzungen wird wie bei den Betrachtungen zum Flugzeugabsturz davon ausgegangen, daß bei Belastungen, wie sie der Auslegung der Bauwerke zugrunde liegen, kein kausales Versagen von Anlageteilen, die zur Beherrschung dieses Ereignisses erforderlich sind, auftritt. Diese Annahme stützt sich auch in diesem Fall auf eine konsequente Auslegung. Die Auslegungsanforderungen der Gutachtensbedingungen werden im Rahmen dieser Arbeit dahingehend interpretiert, daß für die Brennelement-, Reflektorelement- und Steuerstablager im Reaktornebengebäude ein Schutz gegen Explosionsdruckwellen gegeben ist. Weitergehende

Untersuchungen zur Aktivitätsfreisetzung aus dem Reaktornebengebäude erübrigen sich damit.

Ereignisabläufe, die sich aus der Zerstörung von nicht ausgelagerten Bereichen des Kernkraftwerks (Fremdenergie- und Eigenbedarfsversorgung, Anlagen in Maschinenhaus u.a.) ergeben, sind bezüglich der dominierenden Störfallsequenzen mit Häufigkeiten behaftet, die um mehrere Größenordnungen kleiner sind als bei internen Störfällen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß sich aufgrund der Einwirkung von Explosionsdruckwellen auf das Kernkraftwerk mit Lastnnahmen, wie sie in Bild 7 aufgezeigt werden und wie sie der Auslegung zugrunde liegen, aufgrund der geringen Eintrittshäufigkeit und der Auslegung gegen dieses Ereignis kein relevanter Risikobeitrag ergibt. Im weiteren ist deshalb, wie beim Flugzeugabsturz auch, zu diskutieren, ob Explosionsdruckwellen mit höheren Belastungen als sie den Auslegungslastannahmen zugrunde liegen, auftreten können, und mit welcher Häufigkeit gegebenenfalls solche Ereignisse behaftet sind.

Druckwellen, die von einer Detonation oder detonationsähnlichen Vorgängen ausgehen (z.B. Unfälle mit ungesättigten Kohlenwasserstoffen, Sprengstoffen, verdämmte Gaswolken), können zu erheblich höheren Belastungen führen. Ein Schutz gegen derartige Reaktionen wird, unter Berücksichtigung einer Auslegung durch die obengenannte Belastungsfunktion, durch eine Einhaltung von Mindestabständen von kerntechnischen Anlagen zu entsprechenden Stoffen erreicht. Bezüglich der aufgeführten Gefahrenquellen am Standort Hamm-Schmehausen kann festgestellt werden, daß die relevanten Gebäude weiter als die notwendigen Mindestabstände nach /15/ von den potentiellen Unfallorten entfernt sind. Es wurden die Lageplanskizzen aus /9/ zugrunde gelegt. Denkbar ist natürlich auch die Möglichkeit, daß detonationsfähige Gaswolken zum Kernkraftwerk hindriften oder aber auch, daß eine Deflagration unter ungünstigen Randbedingungen in eine Detonation umschlagen kann. Umfangreiche Studien zum Gesamtaspekt "Druckwellen aus Detonationen" werden zur Zeit erarbeitet. Es kann aber festgestellt werden, daß die genannten denkbaren Bedingungen,

Zur sicheren Abschätzung der möglichen Gefährdung über andere Wirkungsketten ist eine Kenntnis der kraftwerksspezifischen¹⁾ Schadstoffe erforderlich, der dann eine Systemanalyse zur Erfassung der sicherheitsrelevanten Störfallabläufe und eine Quantifizierung dieser Abläufe folgen müßte. Solche Arbeiten übersteigen einerseits den Rahmen der Sicherheitsstudie, andererseits dürften sie aufgrund fehlenden Datenmaterials auch zur Zeit noch nicht durchführbar sein.

2.2.4 M e c h a n i s c h e E i n w i r k u n g e n a u f g r u n d d e s V e r s a g e n s v o n S e k u n d ä r k r e i s k o m p o - n e n t e n

Turbinenzerknall

In Anlehnung an verschiedene Arbeiten zu diesem Ereignis, wie zum Beispiel /17/ und /18/, erfolgt nachfolgende Aufgliederung des Unfallablaufs mit den jeweiligen Abschätzungen der Einzelhäufigkeiten bzw. Wahrscheinlichkeiten W_i .

Die Schadenshäufigkeit W ergibt sich dann als Produkt der Einzelwerte.

1. Versagen des Turbinenmotors mit Abgang von Bruchstücken und Zerstörung des Turbinengehäuses (W_1).
2. Wegfliegen von Bruchstücken, Auftreffen auf Gebäude mit sicherheitstechnischer Bedeutung und Zerstörung der Gebäudeaußenwand (W_2).
3. Zerstörung von Anlagenteilen und relevanten Komponenten (W_3).

Zu 1.:

Es handelt sich um eine einwellige Kondensationsdampfturbine mit einem doppelflutigen Hochdruckteil (HD-Teil), einem doppelfluti-

¹⁾ Dies sind Stoffe, die zum Betrieb der Anlage benötigt werden oder dabei anfallen und ggfs. als Schadstoffe auftreten können.

gen Mittelteil (MD-Teil) und drei doppelflutigen Niederdruckteilen (ND-Teilen). HD- und MD-Teil sind Doppelmantel-Konstruktionen, deren Außen- und Innenmäntel horizontal geteilt sind. Der HD-Innenmantel wird durch Schrumpfringe, die übrigen HD- und MD-Mäntel durch Dehnschrauben zusammengehalten. Die ND-Gehäuse sind Schweißkonstruktionen.

Sämtliche Turbinenläufer sind aus Einzelscheiben zusammengesweißt (siehe Bild 8). Neben einem Überdrehzahlversagen könnte auch ein Versagen der peripherischen Schweißnähte von Bedeutung sein. Aus den in der Vergangenheit beobachteten Turbinenunfällen sind für diese Art von Läuferkonstruktionen keine exakten Versagenswahrscheinlichkeiten ableitbar. Anhand von Aussagen in /19/ halten wir einen Wert von $W_1 = 10^{-5}/a$, wie er in der Deutschen Risikostudie als konservative Abschätzung der oberen Grenze für die Eintrittshäufigkeit für einen anderen Turbinentyp angenommen wurde, auch hier für sinnvoll, wobei hervorzuheben ist, daß es sich hier nur um eine Abschätzung der Größenordnung handeln kann.

Zu 2.:

Die Auswertung von Turbinenunfällen zur Erfassung der möglichen Bruchstückformen, -geschwindigkeiten und -energien stützen sich im allgemeinen auf Turbinen mit aufgeschrumpften Rotorscheiben. Eine Übertragung dieser Ergebnisse auf den hier zu betrachtenden Turbinentyp ist nur einschränkt möglich. Für die probabilistischen Abschätzungen wurden die Randbedingungen aus /19/ herangezogen. Der Wert W_2 berücksichtigt die Wahrscheinlichkeit, daß ein Gebäude getroffen wird und die Außenwand so zerstört wird, daß mit Auswirkungen auf die innen angeordneten Anlagenteile zu rechnen ist. W_2 ergibt sich dabei einmal aus dem Verhältnis des Raumwinkels, unter dem eine bestimmte Zielfläche getroffen werden kann, zum möglichen Austrittswinkel der Bruchstücke (Auftrittswahrscheinlichkeit für ein wegfliegendes Bruchstück). Dieses Verhältnis wird dann mit der Anzahl der jeweils zu betrachtenden Bruchstücke multipliziert.

Aufgrund energetischer Betrachtungen können sich die Untersuchungen auf die Niederdruckteile der Turbine beschränken. Hinsicht-

lich der möglichen Austrittsenergie der Bruchstücke sind diese Bauteile gegenüber dem HD-Teil dem MD-Teil und dem Generator von wesentlich größerer Bedeutung. Jeder der drei doppelflutigen ND-Teile (siehe I, II, III in Bild 10) besitzt 2 innere, 2 mittlere und 2 äußere Scheiben. Die energiereichsten Bruchstücke mit dem größten Zerstörungspotential entstehen bei einem angenommenen sprödebruchartigen Versagen der äußeren und mittleren Scheiben bei Berstdrehzahl.

Die durchgeführten Rechnungen bzw. Abschätzungen gehen von folgenden Annahmen aus:

- Ein Versagen erfolgt bei der Berstdrehzahl; für die Ermittlung dieser Drehzahl wird die Streckgrenze des Werkstoffs herangezogen.
- Für die äußeren Scheiben wird ein Austrittswinkelbereich von $\pm 25^\circ$ zur Scheibenebene angenommen.
- Für die mittleren Scheiben wird ein Austrittswinkelbereich von $\pm 10^\circ$ zur Scheibenebene angenommen.
- In der Scheibenebene ist die Austrittswahrscheinlichkeit gleich verteilt.
- Die Anzahl der Bruchstücke wird in Anlehnung an die Arbeiten in /11/ angenommen.
- Der Wegflug der Bruchstücke erfolgt gleich verteilt im angenommenen Austrittswinkelbereich.

Zu 3.:

Entsprechend der Definition des Wahrscheinlichkeitswertes W_2 berücksichtigt W_3 die Wahrscheinlichkeit für die Zerstörung von wichtigen Anlagenteilen und Komponenten im Innern des betreffenden Gebäudes. Da über die detaillierte Anordnung dieser Teile und über den möglichen Schutz durch vorgelagerte Strukturen keine Informationen vorliegen, läßt sich ein gesicherter Wert für W_3 kaum ermitteln. Im Rahmen dieser Untersuchungen zum Turbinenzerknall, die nur eine grobe Abschätzung der Risikorelevanz zum Ziel haben, wird deshalb dieser Wert im allgemeinen konservativ mit Eins angenommen. Teilweise wird auch von der

Belegungsdichte der Gebäudebereiche mit relevanten Komponenten ein Wert abgeleitet.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Ergebnisse der Untersuchungen auf. Sie werden im weiteren für die einzelnen Gebäude, auch im Hinblick auf die Risikorelevanz, diskutiert.

Gebäude	W_1	W_2	W_3	W
a) Reaktorschutzgebäude	$10^{-5}/a$	$2 \cdot 10^{-1}$	< 1	$< 2 \cdot 10^{-6}/a$
b) Schaltanlagegebäude - gegen Flugzeugabsturz geschützte Bereiche		$< 10^{-3}$	< 1	$< 10^{-8}/a$
- gegen Flugzeugabsturz ungeschützte Bereiche		$\approx 10^{-2}$	< 1	$\approx 10^{-7}/a$
c) Reaktornebengebäude - gegen Flugzeugabsturz geschützte Bereiche		$< 1,5 \cdot 10^{-1}$	10^{-1}	$< 1,5 \cdot 10^{-7}$
- gegen Flugzeugabsturz ungeschützte Bereiche		$6 \cdot 10^{-1}$	10^{-1}	$6 \cdot 10^{-7}$
d) Maschinenhaus		1	1	$10^{-5}/a$

a) Reaktorschutzgebäude (RSG)

Die Außenwand des RSG könnte beim Aufprall von Bruchstücken auf 3 Arten versagen:

- Eindringen (das Bruchstück bohrt ein Loch in die Wand)
- Schubbruch (das Bruchstück schlägt einen Schubkeil aus der Wandrückseite)
- Biegebruch (das Bruchstück biegt die Wand durch)

Bei den harten und kompakten Bruchstücken, die bei einem Turbinenzerknall auftreten, müssen die ersten beiden Versagensarten gemeinsam betrachtet werden, da das Bruchstück in der zweiten Hälfte seines Eindringweges seine größte Stoßkraft abgibt. In /19/ wird - mit der kleinstmöglichen Aufschlagfläche des Bruch-

stücks - die größtmögliche Eindringtiefe ermittelt. Die Mindestwanddicke ergibt sich durch Addition der Eindringtiefe mit einer zusätzlichen Wanddicke zur Sicherung gegen Ausbruch eines Schubkeils. Aufgrund der Auslegung des Reaktorschutzgebäudes gegen Flugzeugabsturz kann ein großer Teil der entstehenden Bruchstücke dieses Gebäude nicht gefährden. Die Untersuchungen in /19/ zeigen aber, daß große Bruchstücke der äußeren oder mittleren Scheiben der ND-Teile insgesamt eine Gefahr für die Außenwand darstellen, da sie Mindestwanddicken zwischen 1,59 m und 1,70 m verlangen, während die tatsächliche Wanddicke nur 1,60 m beträgt. Die Rechnungen zeigen weiter, daß ein mögliches Bruchstück auch bezüglich der Stoßkräfte den Auslegungswert von 110 MN geringfügig überschreitet.

Die Bilder 9 bis 14 zeigen die möglicherweise gefährdeten Bereiche des Reaktorschutzgebäudes. Dabei wird angenommen, daß Aufschlagwinkel, die mehr als $\pm 20^\circ$ von der Senkrechten zur RSG-Außenwand abweichen, einen solchen Abfall der Bruchbruchseffektivität bewirken, daß sie (unter Berücksichtigung der vorhandenen Auslegung) vernachlässigt werden können. Mit Hilfe der Bilder 9 bis 14 wurde die Treffwahrscheinlichkeit für den gefährdeten Bereich ermittelt. Für ein Bruchstück ergibt sich ein mittlerer Wert von $3,8 \cdot 10^{-2}$.

Es können maximal 10 und minimal 1 berstende Scheibe das RSG gefährden. Im Rahmen dieser Abschätzungen wird davon ausgegangen, daß im Mittel 5 Scheiben bersten und pro Scheibe nur ein Bruchstück entsteht, welches die entsprechenden Voraussetzungen (Energie, Form) für ein Versagen der RSG-Außenwand besitzt. Die Wahrscheinlichkeit W_2 errechnet sich demnach zu $1,9 \cdot 10^{-1}$ bzw. $2 \cdot 10^{-1}$. Die Bilder 9 bis 14 berücksichtigen nur Treffer auf geradlinigen Flugbahnen. Indirekte Bruchstückflugbahnen könnten das RSG-Dach gefährden. Die Treffwahrscheinlichkeit liegt aber um Größenordnungen unter dem genannten Wert für die direkten Flugbahnen.

Wird die RSG-Außenwand zerstört, so kann die Wahrscheinlichkeit W_3 dafür, daß auch innenliegende Anlagenteile beeinträchtigt wurden, pauschal nur mit einem Wert kleiner Eins abgeschätzt werden.

Für eine bessere Abschätzung liegen derzeit zu wenig Informationen über die Anordnung von Anlagenteilen und ihre konstruktive Ausbildung vor. Direkt gefährdet ist zunächst eine Redundanz des Hilfskühlsystems. Es ist aber auch nicht auszuschließen, daß es aufgrund von Einwirkungen auf den SSB zur schnellen Druckentlastung und zum indirekten Versagen des gesamten Hilfskühlsystems und damit zur Core-Aufheizung kommen kann. Die Eintrittshäufigkeit für solche Ereignisse dürfte aber gegenüber dem ermittelten Wert für die Schadenshäufigkeit W ($< 2 \cdot 10^{-6}/a$) noch mit einem erheblichen Abstand behaftet sein. Im Hinblick auf das Risiko ist aber zu bedenken, daß aufgrund des zerstörten RSG mit entsprechend ungünstigen Spaltproduktfreisetzungen zu rechnen ist.

b) Schaltanlagegebäude

Die Betrachtungen unterscheiden zwischen dem Bereich, der gegen den Lastfall "Flugzeugabsturz" geschützt ist und dem dagegen nicht geschützten Bereich. Bei der vorgesehenen Anordnung sind Bruchstücktreffer über direkte Flugbahnen für beide Bereiche praktisch auszuschließen. Indirekte Bruchstücktreffer können mit einem Wert kleiner 10^{-3} für W_2 berücksichtigt werden. Dieser Wert erhöht sich für den ungeschützten Bereich aufgrund der höheren Anzahl der zu berücksichtigenden Bruchstücke auf ca. 10^{-2} . W_3 kann in beiden Fällen derzeit nur konservativ mit kleiner Eins abgeschätzt werden. Im ersten Fall (gegen Flugzeugabsturz geschützte Bereiche) ergibt sich eine Schadenshäufigkeit von kleiner $10^{-8}/a$. Berücksichtigt man weiter, daß in diesem hier untersuchten Bereich 3 räumlich getrennte Redundanzen die Energieversorgung und die Nachwärmeabfuhr über das Hilfskühlsystem sicherstellen, so liegt die Eintrittshäufigkeit für Folgeereignisse mit Core-Aufheizung um Größenordnungen unter dem Wert von $10^{-8}/a$ und ist dementsprechend für diese Risikobetrachtungen ohne Bedeutung. Im zweiten Fall (gegen Flugzeugabsturz nicht geschützte Bereiche) stellt die Schadenshäufigkeit mit ca. $10^{-7}/a$ im wesentlichen einen Wert für den Ausfall der Warte aufgrund des auslösenden Ereignisses "Turbinenzerknall" dar. Die Eintrittshäufigkeit für dieses Ereignis ist damit noch etwas geringer als es

aufgrund eines Flugzeugabsturzes zu erwarten wäre. Der Ausfall der Warte ist systemtechnisch beherrschbar und führt mit den hier genannten Eintrittshäufigkeiten zu keinen nennenswerten Risikobeiträgen.

c) Reaktornebengebäude

Wie beim Schaltanlagegebäude wird auch hier zwischen dem gegen Flugzeugabsturz geschützten bzw. nicht geschützten Bereich unterschieden. Bei der Abschätzung von W_2 kommen lediglich direkte Bruchstückflugbahnen zum Tragen. Der Wert für den jeweils untersuchten Bereich unterscheidet sich nur durch die Anzahl der zu berücksichtigenden Bruchstücke, da Angaben über die Lage und Ausmaße der geschützten Bereiche nicht vorliegen. Da die schutzbedürftigen Bereiche im Reaktornebengebäude aber relativ klein sind und insgesamt die Belegungsdichte mit sicherheitstechnisch wichtigen Anlagenteilen nicht sehr groß ist, wurde in beiden Fällen W_3 grob mit 10^{-1} abgeschätzt. Die Schadenshäufigkeit ist im ersten Fall kleiner $1,5 \cdot 10^{-7}/a$. Dieser Wert stellt eine konservative Abschätzung für lokale Beschädigungen an aktivitätshaltigen Anlagenteilen in diesem Gebäude dar. Da gegenüber dem Ereignis "Flugzeugabsturz" in diesem Fall nicht mit einem Brand zu rechnen ist (die thermischen Randbedingungen beeinflussen die Freisetzung sehr stark) und die Einwirkungsfläche wesentlich kleiner ist, wird diesem Ereignis keine Risikorelevanz beigemessen. Für die im nicht geschützten Bereich angeordneten aktivitätshaltigen Anlagenteile gelten die gleichen Überlegungen wie in Kapitel 2.2.1.

d) Maschinenhaus

Auswertungen von stattgefundenen Ereignissen in konventionellen Kraftwerken lassen erkennen, daß bei einem Turbinenzerknall am Maschinenhausgebäude und an den innen angeordneten Anlagenteilen umfangreiche Schäden zu erwarten sind. Dementsprechend ist mit der Eintrittshäufigkeit von $10^{-5}/a$ für das auslösende Ereignis ein Ausfall aller Systeme im Bereich des Maschinenhauses anzunehmen. Als wesentliche Ausfälle wären zu nennen:

- Ausfall des Hauptkühlsystems,
- Ausfall der Eigenbedarfsversorgung einschließlich der Fremdenergieversorgung.

Ereignisabläufe, die sich aus diesen Ausfällen ergeben können, sind bezüglich der dominierenden Störfallsequenzen mit Häufigkeiten behaftet, die um mindestens eine Größenordnung kleiner sind als bei internen Störfällen.

Die Diskussion der Ergebnisse zeigt, daß die möglichen Einwirkungen auf das Reaktorschutzgebäude unter Risikogesichtspunkten genauer zu betrachten sind. In /8/ wird auf eine mögliche Änderung der Gebäudeanordnung und damit Drehung der Turbinenachse verwiesen, für den Fall, daß eine Schadensumfanganalyse zeigt, daß das "Restrisiko" nicht akzeptierbar ist. Die Erstellung einer detaillierten Analyse kann aufgrund des hierzu notwendigen Arbeitsumfangs nicht Gegenstand dieser Studie sein. Die hier angestellten Untersuchungen zeigen, daß die Frage nach der Risikorelevanz eng verknüpft ist mit der Quantifizierung der Folgeereignisse bei vorgegangener Zerstörung der RSG-Außenwand. Diese Quantifizierung ist im Rahmen der Untersuchungen nicht möglich. Es kann aber grob abgeschätzt werden, daß die bedingte Wahrscheinlichkeit für Folgeereignisse mit Core-Aufheizung keinesfalls größer 10^{-2} sein darf, damit dieser Ereignisablauf nicht dominierende Beiträge nach sich zieht.

Bei neueren Leichtwasserreaktoren wird entsprechend /3/ gefordert, daß die Ausrichtung der Turbinenachse so erfolgt, daß die sicherheitstechnisch wichtigen Komponenten nicht innerhalb der wahrscheinlichen Flugrichtung möglicher Bruchstücke des Turbosatzes liegen. Wendet man diese Forderung auf den HTR an, wie es in /8/ schon angedeutet wurde, so erniedrigt sich die Treffwahrscheinlichkeit für das RSG um ca. 2 Größenordnungen. Berücksichtigt man darüber hinaus noch, daß bei indirekten Flugbahnen die Energieverluste durch den Luftwiderstand erheblich sind, so ist bei Berücksichtigung einer solchen Auslegungsforderung keine direkte Gefährdung und entsprechend auch kein wesentlicher Risikobeitrag zu erwarten.

Versagen von Druckbehältern des Sekundärkreises

Als Ereignisse im Sinne der äußeren Einwirkungen sind solche Versagensmöglichkeiten anzusehen, bei denen die mechanischen Einwirkungen auf andere Systeme oder Anlagenteile vergleichbar sind mit Auswirkungen von Explosionsdruckwellen und Flugzeugabsturz.

Die nachfolgenden Überlegungen beschränken sich nur auf Komponenten im Maschinenhaus. Mit Ausnahme des Speisewasserbehälters liegen Angaben über die Anordnung und sonstige technische Daten nicht vor. Analysen, die als Unterlagen zu den Arbeiten in der Deutschen Risikostudie vorlagen, zeigen, daß der Speisewasserbehälter aber der Behälter mit dem höchsten Energiepotential ist.

Daten: Volumen 450 m³
Länge 45 m

Er ist auf Kote 29,5 m in Längsrichtung zum Maschinenhaus angeordnet.

Aus der schadensstatistischen Auswertung für konventionelle Behälter läßt sich eine Versagenswahrscheinlichkeit von ca. $1 \cdot 10^{-5}/a$ pro Druckbehälterbetriebsjahr ableiten /20/. Dieser Wert erscheint auch auf HTR-Sekundärkreiskomponenten übertragbar zu sein.

Versagensmöglichkeiten ergeben sich durch spontanes Bersten und durch Rißbildung.

Im ersten Fall lassen sich die zu erwartenden Belastungen auf die resultierende Druckwelle und die im Strömungsfeld beschleunigten Bruchstücke zurückführen.

Bei einer Rißbildung kann es zum Teilabriß von Behälterteilen kommen, deren Beschleunigung dann in Abhängigkeit von der geometrischen Form auch durch den Wasser-/Dampf-Inhalt erfolgt.

Im Hinblick auf die mögliche Schadenserwartung lassen sich folgende Aspekte aufzeigen:

- Rechnungen im Zusammenhang mit der Druckwellenbelastung, wie sie für die Arbeiten in der Deutschen Risikostudie vorlagen, liegen für den HTR nicht vor. Trotz des geringen Abstands zum Reaktorschutzgebäude (minimal ca. 15 m) dürfte aber eine wesentliche Beeinträchtigung dieses Gebäudes aufgrund seiner Auslegung gegen andere äußere Einwirkungen (Flugzeugabsturz, Explosionsdruckwelle) auszuschließen sein. Entsprechendes gilt auch für Bruchstückeinwirkungen auf dieses Gebäude.
- Inwieweit die anzunehmende Druckwellenbelastung Schäden am Reaktornebengebäude und im Bereich der Warte des Schaltanlagegebäudes verursachen kann, läßt sich zur Zeit kaum abschätzen. Bruchstückeinwirkungen sind nur dann von Bedeutung, wenn eine Vorschädigung von Gebäudewänden durch die Druckwelle anzunehmen ist. Es kann aber davon ausgegangen werden, daß auch hier für die Bereiche, die gegen andere äußere Einwirkungen (Flugzeugabsturz, Explosionsdruckwelle) ausgelegt wurden, keine wesentliche Beeinträchtigung zu erwarten ist.
- Geschoßartige größere Behälterteile, die sich bei einem Umfangsriß bilden können, sind in der Lage, große kinetische Energien aufzunehmen. Eine Gefährdung der Anlage kann allerdings aufgrund der Lage des Speisewasserbehälters ausgeschlossen werden.

Zusammenfassend wird aufgrund dieser qualitativen Betrachtungen und aufgrund der relativ geringen Eintrittshäufigkeit davon ausgegangen, daß das Versagen von Druckbehältern im Sekundärkreis nicht zu dominierenden Risikobeiträgen führt.

3. ZUSAMMENFASSUNG

Der Einfluß von äußeren Einwirkungen auf das Risiko wird in der AIPA-Studie lediglich durch Erdbeben berücksichtigt. In der Phase Ib der probabilistischen Sicherheitsstudie HTR wurde es bei der Untersuchung der auslösenden Ereignisse auf Vollständigkeit als notwendig angesehen, andere mögliche äußere Einwirkungen, zumindest in einer Grobabschätzung, auf ihre Risikorelevanz hin ebenfalls zu untersuchen. Außer dem Ereignis Erdbeben, welches gesondert untersucht wird, werden betrachtet:

Unwetter, extreme Wasserstände, Flugzeugabsturz, Explosionsdruckwelle, schädliche Stoffe und mechanische Einwirkungen aufgrund des Versagens von Sekundärkreiskomponenten. Die Problematik der Sabotage und mögliche Risikobeiträge, die sich durch Störmaßnahmen Dritter ergeben können, werden, wie in der Deutschen Risikostudie, auch in dieser Studie nicht betrachtet.

Im Rahmen dieser Studie konnte der Einfluß äußerer Einwirkungen nur für einen angenommenen Standort untersucht werden. Die Ergebnisse gelten deshalb uneingeschränkt nur für den betrachteten Standort Hamm-Schmehausen. Bezüglich der Gefährdung durch äußere Einwirkungen kann dieser Standort aber als für die Bundesrepublik Deutschland durchschnittlich exponierter Ort angesehen werden. Zur Abschätzung des Risikos wird folgendes Vorgehen angewandt. Ausgehend von der Standortsituation wird für die jeweils untersuchten äußeren Einwirkungen die Eintrittshäufigkeit für solche auslösende Ereignisse ermittelt, deren maximale Belastung bei der Auslegung zugrunde gelegt wurde. Bei den geschützten Anlagenbereichen wird dann aufgrund der Auslegung davon ausgegangen, daß die Ausfallhäufigkeit für geschützte Anlagenteile nur von der Zuverlässigkeit der Systeme abhängt und dementsprechend wesentlich geringer ist als die Eintrittshäufigkeit des auslösenden Ereignisses ist. Bei den nicht geschützten Anlagenteilen wird ohne weitergehende Untersuchungen ein Versagen infolge der äußeren Einwirkung angenommen und im weiteren untersucht, inwieweit die Häufigkeit der sich daraus ergebenden Ereignisabläufe sich von der Häufigkeit für vergleichbare Ereignisabläufe aus anlageninternen Störfällen unterscheidet. Ab-

schließlich wird untersucht, ob die bei der Auslegung berücksichtigten Lastannahmen überschritten werden können und mit welcher Häufigkeit dies gegebenenfalls zu erwarten ist.

Ergebnisse:

Unwetter

Die Untersuchungen zeigen, daß die beobachteten und zu erwartenden Windverhältnisse im Standortbereich aufgrund der baulichen Auslegung gegen Windlasten und der Auslegung gegen andere äußere Einwirkungen keine Gefährdung der Anlage erwarten lassen.

Für die bei der Referenzanlage zu erwartenden Häufigkeiten für Blitzeinschläge läßt sich aufgrund fehlenden Datenmaterials eine quantitative Risikoanalyse für dieses Ereignis derzeit nicht durchführen. Da HTR-spezifische Gesichtspunkte nicht zu erkennen sind, wird auf die Arbeiten in der Deutschen Risikostudie verwiesen. In der Phase A erfolgt dort aufgrund grober Abschätzungen die Feststellung, daß Blitzschlag die Kernschmelzhäufigkeit nur wenig beeinflusst; in der Phase B wird eine Absicherung dieser Aussage angestrebt.

Extreme Wasserstände

Angaben über die Häufigkeit extremer Flußwasserstände liegen nicht vor. Die Schadenserwartung bei einem angenommenen hochwasserbedingten Wassereinbruch wird aufgezeigt. Die vorhandene Höhendifferenz zwischen dem höchsten beobachteten Wasserstand und dem Geländeniveau stellt eine Reserve gegen denkbare Überschreitungen dar. Weitergehende Untersuchungen mit dem Ziel, die qualitativen Überlegungen auch quantitativ abzusichern, sind einerseits im vorgesehenen Rahmen der Studie nicht durchführbar, andererseits aufgrund angestrebter höherer Auslegungsanforderungen für neue Anlagen wenig sinnvoll.

Der Teilaspekt "Niedrigwasser" ist für die hier angestellten Risikountersuchungen ohne Bedeutung.

Flugzeugabsturz

Die den Risikoabschätzungen zugrunde liegende Annahme, daß bei einem Flugzeugabsturz kein kausales Versagen von Anlagenteilen, die zur Beherrschung dieses Ereignisses erforderlich sind, auftritt, setzt eine entsprechende Auslegung voraus. Bei der im Rahmen des Genehmigungsverfahrens für die Referenzanlage durchgeführten Begutachtung des Auslegungskonzepts wurden Schwachstellen erkannt und anhand von Gutachtensbedingungen Verbesserungen gefordert. Diese Gutachtensbedingungen werden bei den hier angestellten Untersuchungen als erfüllt mitberücksichtigt. Es wird festgestellt, daß ein Flugzeugabsturz auf das Kernkraftwerk mit den angegebenen Lastannahmen aufgrund der geringen Eintrittshäufigkeit und der Auslegung gegen dieses Ereignis keinen relevanten Risikobeitrag ergibt. Die Diskussion einer möglichen Überschreitung der Auslegungslastannahmen läßt erkennen, daß Absturzsituationen, die zu einer solchen Überschreitung führen könnten, mit sehr geringen Eintrittshäufigkeiten behaftet sind und dementsprechend für diese Risikobetrachtungen keine Bedeutung haben.

Explosionsdruckwelle

Anhand der Betrachtung der Standortsituation wurden potentielle Unfallorte erkannt. Da aber statistische Daten über das Unfallgeschehen an diesen Orten nicht vorliegen, läßt sich eine mögliche standortabhängige Gefährdung probabilistisch nicht erfassen. Pauschal wird aber festgestellt, daß für den Standort Schmehausen bezüglich Explosionsdruckwellen im Vergleich zu anderen Kernkraftwerksstandorten keine besondere Gefährdung besteht. Aus diesem Grund wurde für diese Studie die Eintrittshäufigkeit für das auslösende Ereignis aus der Deutschen Risikostudie übernommen. Dort gehen die Untersuchungen davon aus, daß eine mögliche Gefährdung für den dort untersuchten Standort Biblis im wesentlichen von Schiffstransporten auf dem Rhein ausgeht. Die Risikoabschätzungen für den HTR lassen insgesamt, das heißt sowohl für die angegebenen Belastungen als auch bei möglicherweise höheren Belastungen, keine Relevanz erkennen. Bei der Auslegungsbeurteilung wurden dabei wieder, wie beim Flugzeugabsturz, Auslegungs-

verbesserungen aufgrund der als erfüllt angenommenen Gutachtensbedingungen mitberücksichtigt.

Schädliche Stoffe

Bezüglich der Einwirkung von nicht kraftwerksspezifischen Schadstoffen wird auf die Deutsche Risikostudie und auf ein Forschungsvorhaben des Bundesministers für Forschung und Technologie verwiesen. Die Arbeiten an diesem Forschungsvorhaben stehen derzeit vor dem Abschluß. Es ist vorgesehen, die Ergebnisse in die Phase B der Deutschen Risikostudie einzuarbeiten. Eine Abschätzung der möglichen Gefährdung durch kraftwerksspezifische Schadstoffe ist aufgrund des geringen Detaillierungsgrads der Anlagenbeschreibung nicht möglich.

Mechanische Einwirkungen aufgrund des Versagens von Sekundärkomponenten

Untersucht werden die Ereignisse Turbinenzerknall und Druckbehälterversagen. Es zeigt sich, daß die möglichen Einwirkungen auf das Reaktorschutzgebäude aufgrund eines Turbinenzerknalls näher zu betrachten sind. Die Analysen ergeben, daß die Frage nach der Risikorelevanz eng verknüpft ist mit der Quantifizierung von Folgeereignissen bei vorangegangener Zerstörung der Außenwand des Reaktorschutzgebäudes. Diese Quantifizierung ist im Rahmen dieser Untersuchungen nicht möglich. Eine grobe Abschätzung ergibt, daß die Wahrscheinlichkeit für Folgeereignisse mit Core-Aufheizung keinesfalls größer 10^{-2} sein darf, damit dieser Ereignisablauf nicht dominierende Beiträge zum Risiko nach sich zieht. Wendet man Auslegungsanforderungen bezüglich der baulichen Anordnung, wie sie für Leichtwasserreaktoren gelten, auch auf die Referenzanlage an, so erniedrigt sich sowohl die Trefferwahrscheinlichkeit für Turbinenbruchstücke auf das Reaktorschutzgebäude um ca. zwei Größenordnungen als auch die kinetische Energie der Bruchstücke. Unter dieser Voraussetzung ergibt sich kein wesentlicher Risikobeitrag.

Aus den Ergebnissen der durchgeführten Arbeiten ergeben sich für zukünftige Hochtemperaturreaktoren im wesentlichen vier Schlußfolgerungen:

1. Ein Schutz gegen Explosionsdruckwelle und Flugzeugabsturz deckt auch andere Belastungen mit wesentlich größerer Eintrittshäufigkeit ab, wie zum Beispiel Belastungen durch extreme Stürme, die bei der diesbezüglich erfolgten Auslegung nicht berücksichtigt wurden. Aus diesem Grund tragen auch solche Belastungen nicht zum Risiko bei.
2. Einer möglichen Gefährdung durch Hochwasser sollte, abhängig von der Standortsituation, verstärkte Beachtung geschenkt werden. Ein probabilistisches Auslegungskonzept ist hier zu empfehlen.
3. Die Ausrichtung der Turbinenachse sollte, entsprechend der Auslegungsforderung für Leichtwasserreaktoren so erfolgen, daß sicherheitstechnisch wichtige Komponenten nicht innerhalb der wahrscheinlichen Flugrichtung möglicher Bruchstücke des Turbosatzes liegen.
4. Da die Untersuchungen sich auftragsgemäß nur auf das Konzept der Referenzanlage und den angenommenen Standort beziehen, wurde nicht untersucht, inwieweit die Nutzung des HTR als Prozeßwärmeerzeuger für chemische Anlagen einen Einfluß auf die Gefährdung durch Explosionsdruckwellen hat. Dieser Aspekt wäre bei der Konzeption solcher Anlagen auch unter Risikogesichtspunkten näher zu betrachten.

Schrifttum

- /1/ HTGR Accident Imitation and Progression Analysis
Status Report Vo. I-VIII, ERDA Report, GA-A 13617/
UC-77, 1/1976, 5/1977

- /2/ KFA Jülich GmbH, ISF III, Dr. W. Kröger, Bestellan-
forderung Nr. 36302 vom 31.5.1978

- /3/ Reaktor-Sicherheitskommission: RSK-Leitlinien für
Druckwasserreaktoren, 2. Ausgabe, 24. Jan. 1979

- /4/ Kaestle, H., Gesellschaft für Reaktorsicherheit,
Arbeitsbericht GRS-A-105, Gegenüberstellung von Meß-
werten der Windgeschwindigkeiten mit den der Ausle-
gung von Kernkraftwerken zugrunde gelegten Werten,
Jan. 78

- /5/ H. Prinz, München, Gewitterelektrizität als Gefahr,
Sonderdruck aus dem Bulletin des Schweizerischen
Elektronischen Vereins, Bd. 67 (1976), Nr. 24,
S. 1313 - 1322

- /6/ Schreiben der Bundesanstalt für Flugsicherung, Frank-
furt, SC-023 La/Be vom 9.1978

- /7/ Fürste W., Essen und Glupe G., Münster,
Absturzhäufigkeit von Flugzeugen auf Kernkraftwerke,
Sonderdruck aus Technische Überwachung 15 (1974),
Nr. 4, S. 115 - 119

- /8/ Rheinisch-Westfälischer Technischer Überwachungs-
Verein e.V., Sicherheitsgutachten über das 1160 MW_e-
Demonstrationskernkraftwerk mit Hochtemperatur,
Teil 1, Bd. 1 und 2, Essen, Febr. 1977

- /9/ Vereinigte Elektrizitätswerke Westfalen AG,
Konsortium Brown Boveri + Cie. AG - Hochtemperatur-
Reaktorbau GmbH, 1160 MW_e HTR Demonstrations-Kern-
kraftwerk, Sicherheitsbericht Stand: August 1975

- /10/ Schutz von Kernkraftwerken gegen äußere Einwirkun-
gen - Flugzeugabsturz, Druckwellen, Erdbeben,
10. IRS-Fachgespräch, Köln, 30./31. Oktober 1974,
IRS-T-27, April 1975

- /11/ Gesellschaft für Reaktorsicherheit im Auftrage des
Bundesministeriums für Forschung und Technologie,
Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke, Verlag TÜV
Rheinland GmbH, Köln, 1979

- /12/ Hochtemperatur-Reaktorbau GmbH, Mannheim, Aktivitäts-
inventarliste für das Reaktornebengebäude, Auszüge
aus dem Bericht 682.042, 8.79

- /13/ G. Johannsohn, Bremen, im Auftrag der RWE-AG, Essen,
Gefährdung von Kernkraftwerken durch Luftstoßbean-
spruchungen von Gasexplosionen und Gasedetonationen
als Folge von Gastankerkollisionen auf BRD-See- und
Binnenwasserstraßen, 16.12.71

- /14/ Gesellschaft für Reaktorsicherheit; Arbeitsunterlagen,
die zur Begutachtung des geplanten Kernkraftwerks BASF
erstellt wurden.

- /15/ Bundesministerium des Innern; Richtlinie für den
Schutz von Kernkraftwerken gegen Druckwellen aus che-
mischen Reaktionen durch Auslegung der Kernkraftwerke
hinsichtlich ihrer Festigkeit und induzierter Schwin-
gungen sowie durch Sicherheitsabstände, Bek. d. BMI
vom 1.8.1976 - RS I 4 - 513 145/1

- /16/ Battelle-Institut e.V., Frankfurt, im Auftrag des Bundesministeriums für Forschung und Technologie, Forschungsvorhaben RS 265, Einwirkungen von Schadstoffen für Kernkraftwerke

- /17/ Busch, Sp. H., Probability of Damage to Nuclear Components Due to Turbine Failure, Nuclear Safety, Vol. 14, No. 3 May-June 1973

- /18/ Westinghouse Electric Corporation Steam Turbine Division Engineering; Analysis of the probability of the generation and strike of missiles from a nuclear turbine, March 1974

- /19/ Brown Boveri & Cie. AG, Mannheim, Aktennotiz Nr. 2/79 5185/Merkel und Aktennotiz Dr. C. Linder 21.5.79, Betreff: HTR 1160 MW_e Turbinenläuferversagen, Gefährdung des Reaktorschutzgebäudes

- /20/ Schadensstatistische Auswertungen zum Versagen mechanisch beanspruchter Bauteile konventionelle Druckbehälter, Forschungsbericht der TÜV-Arbeitsgemeinschaft Kerntechnik West, 010/78/001, Köln, Juni 1978

- /21/ Kaestle, H., Gesellschaft für Reaktorsicherheit, Stellungnahme für die RSK zur Frage "ob durch die Auslegung gegen äußere Einwirkungen wie Flugzeugabsturz, chemische Explosionen und Erdbeben, die Belastungen des Kernkraftwerks, die durch Tromben hervorgerufen wurden, abgedeckt sind", Köln, 6. Mai 1977, Kae-gie 77502

- /22/ Dick, Schnadt - Institut für Unfallforschung des TÜV Rheinland e.V.; Studie zur Beurteilung des Standortes "BASF-Mitte" Abschnitt: Flugzeugabsturzwahrscheinlichkeit, IfU 2/70

- /23/ L. Sütterlin; Inst. für Reaktorsicherheit;
Zur Auslegung kerntechnischer Anlagen gegen Einwirkungen von außen, Teilaspekt: Betrachtungen über das Risiko bei Flugzeugabsturz auf ein Kernkraftwerk, Zwischenbericht IRS-W-12, März 1975
- /24/ Gewitterhäufigkeit in der Bundesrepublik
ETZ-A, Heft 15 (1954), S. 503
- /25/ Caspar, W.:
Maximale Windgeschwindigkeit in der Bundesrepublik Deutschland
Bautechnik (1970) Bd. 47

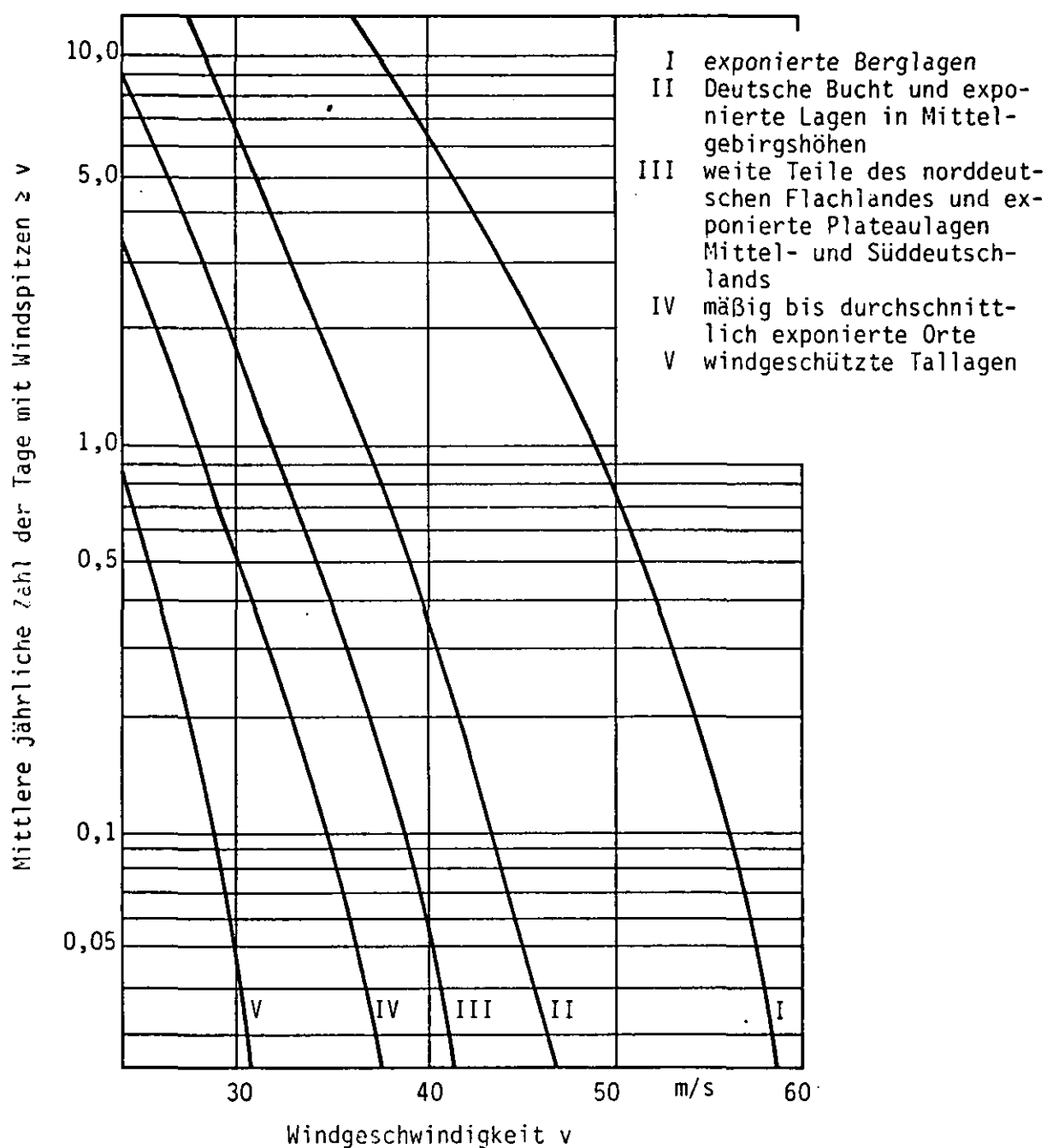


Bild 1:

Überschreitungshäufigkeit von Tagesmaxima der Windgeschwindigkeit nach / 25/

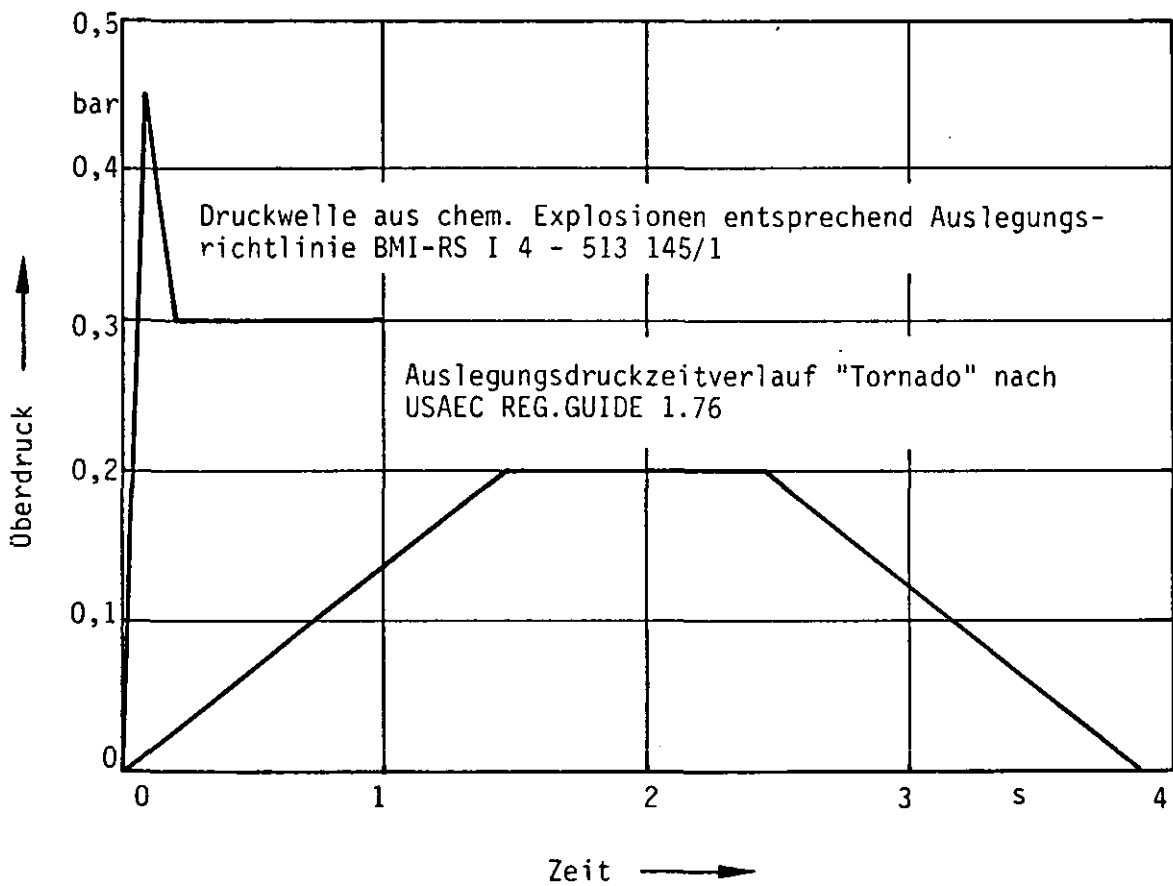


Bild 2:

Vergleich der Druck-Zeitverläufe für "Druckwellen aus chemischen Explosionen" und Druckbeaufschlagung bei einem "Tornado"

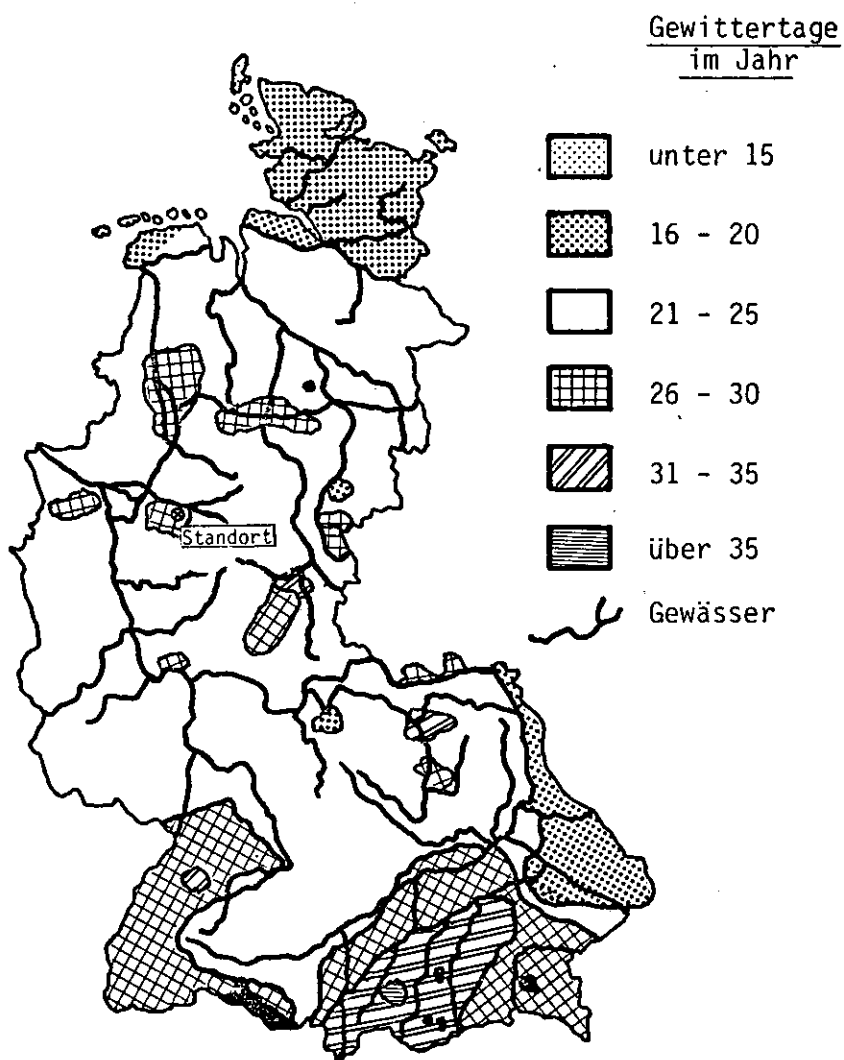


Bild 3:

Gewitterhäufigkeit in der Bundesrepublik Deutschland nach / 24/

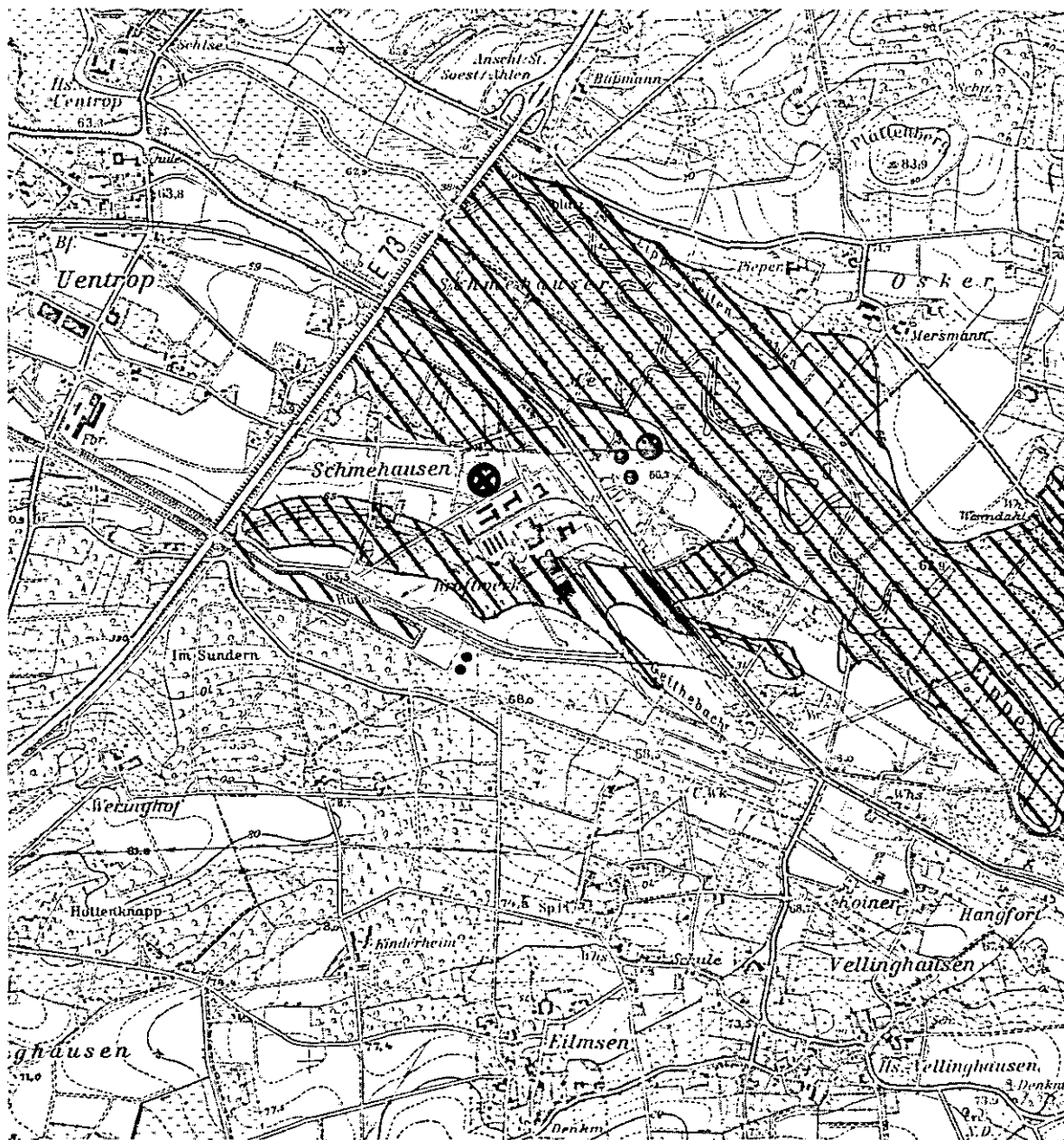


Bild 4: Überflutetes Gebiet am Standort beim Hochwasserstand 65 m üNN (HHW)

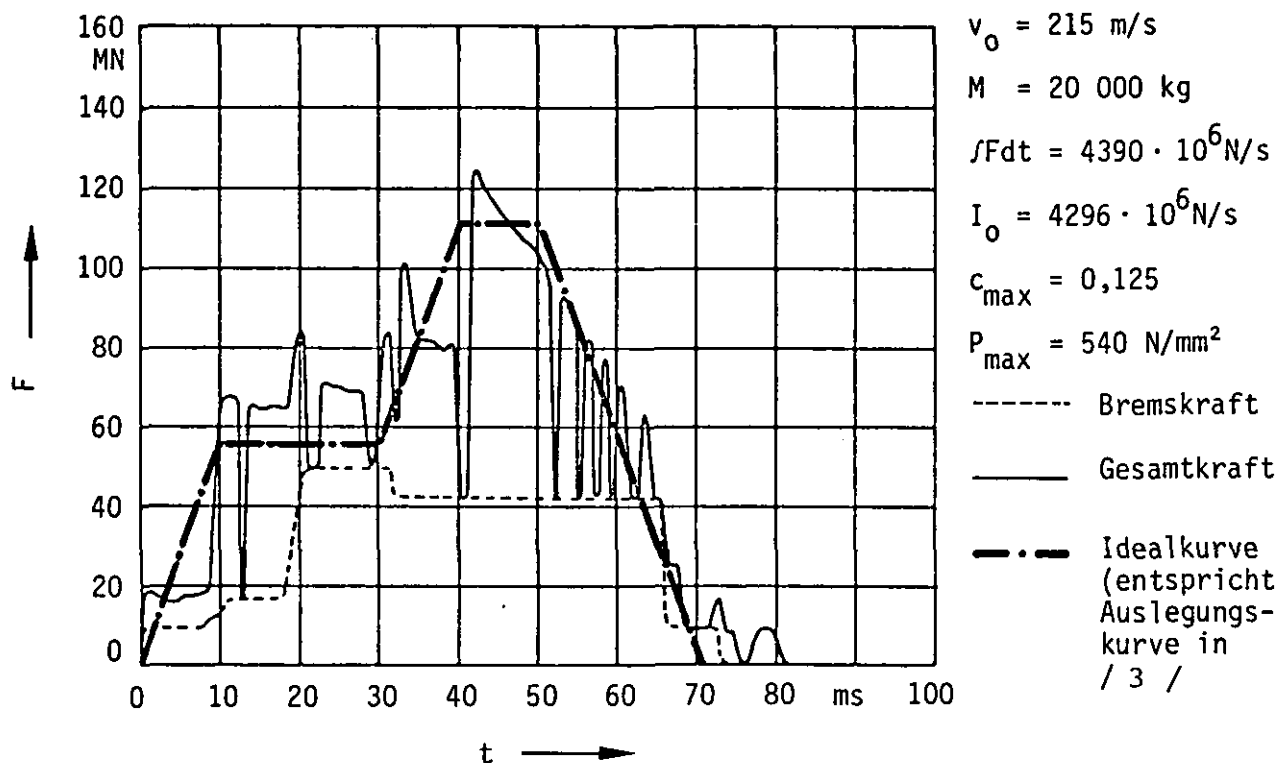


Bild 5:

Bremskraft, Gesamtkraft und Idealkurve in Abhängigkeit von der Zeit für eine schnellfliegende Militärmaschine vom Typ Phantom beim Absturz auf eine starre Wand nach /10/

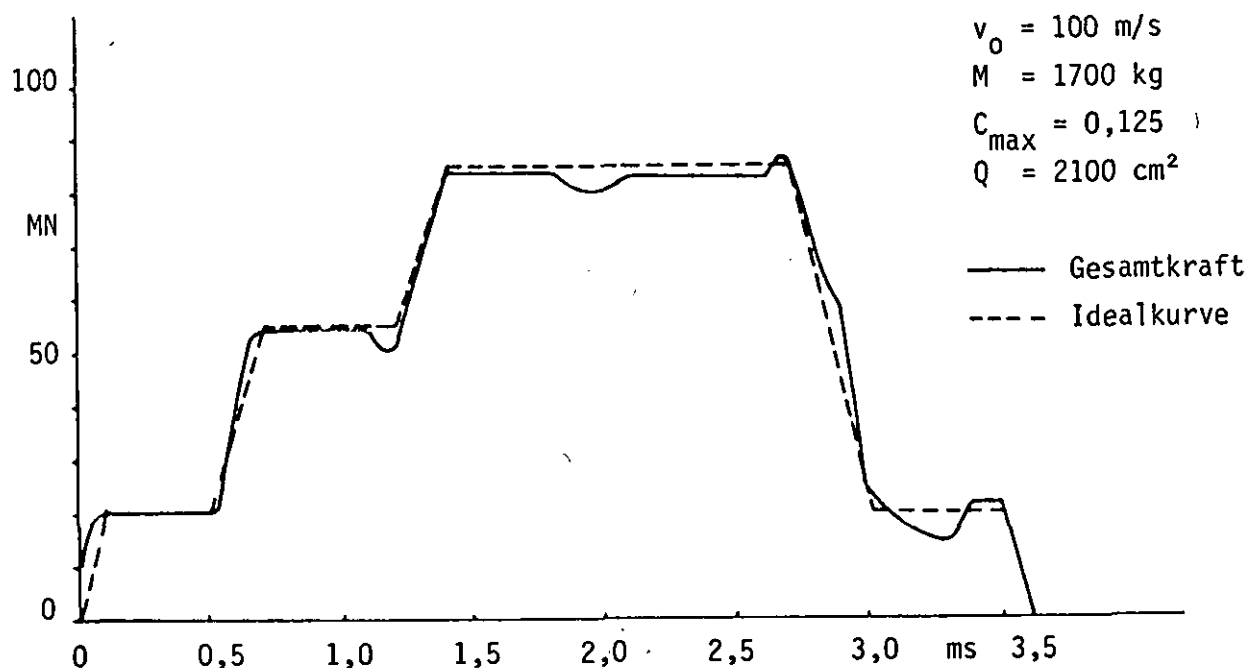


Bild 6:

Gesamtkraft und Idealkurve in Abhängigkeit von der Zeit für ein Triebwerk von 1700 kg Masse beim Aufprall auf eine starre Wand nach /10/

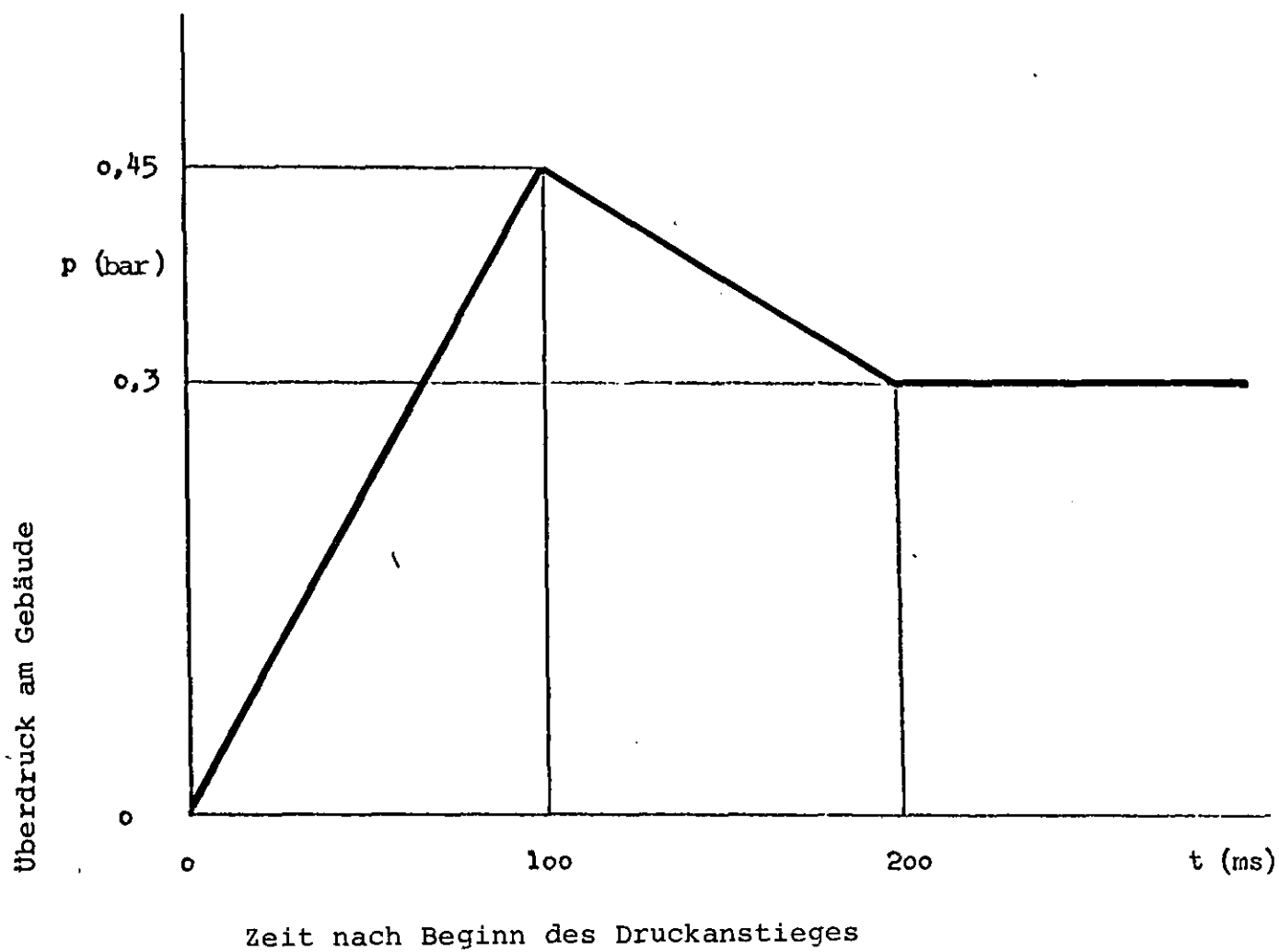


Bild 7: Belastungsdiagramm aus der Deflagration einer Gaswolke

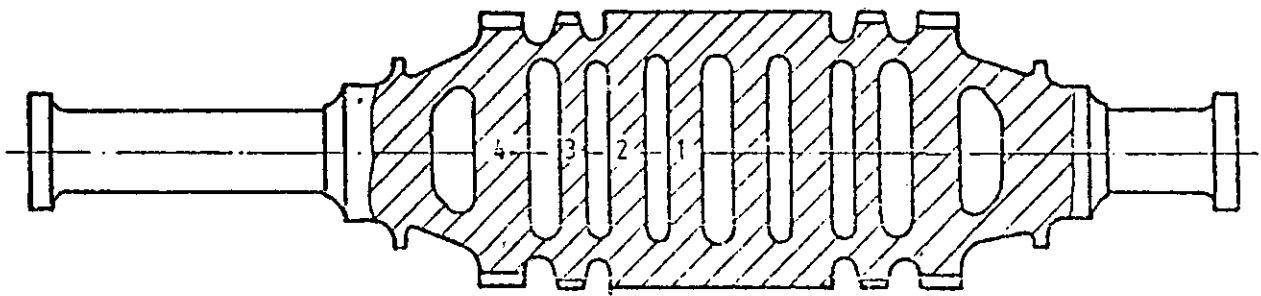


Bild 1: BEC-Bauart - zum Trommelrotor verschweißte Vollscheiben mit angeschnierten Kupplungen.

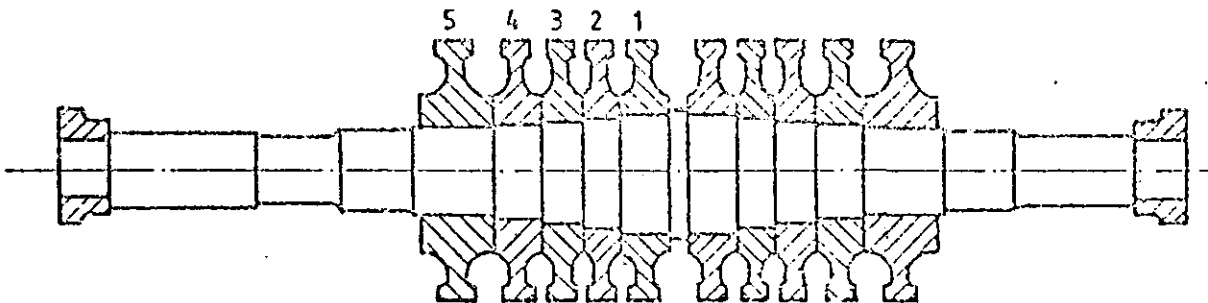
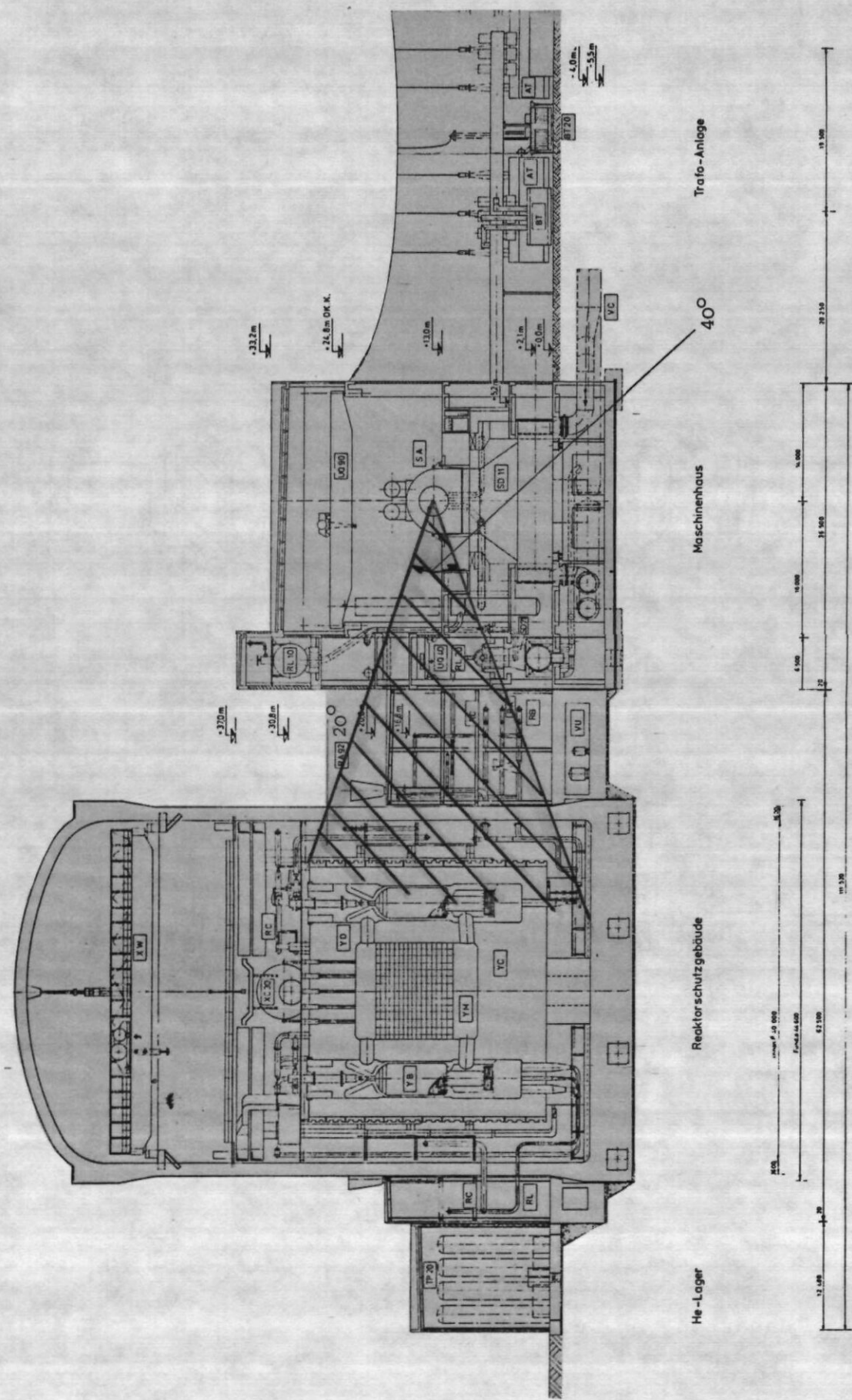


Bild 2: Radscheibenbauart - Zentralwelle mit aufgeschraubten Hohl-scheiben und aufgeschraubten Kupplungen.

Bild 8: Bauarten von Turbinenrotoren



Flugbahnen, welche das RSG gefährden können



Bild 9: Wirkungsbereiche von Turbinenbruchstücken

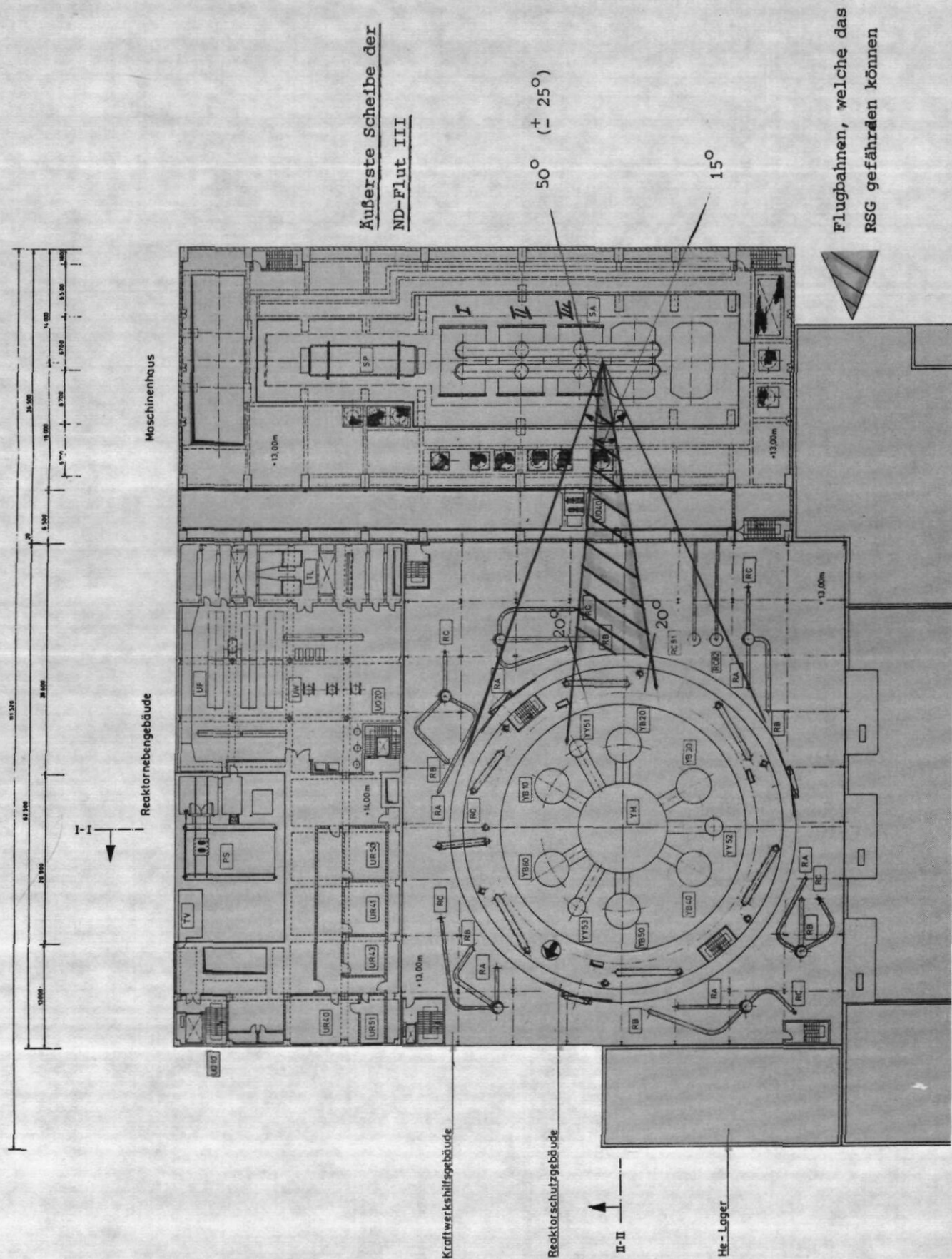


Bild 11: Wirkungsbereich von Turbinenbruchstücken

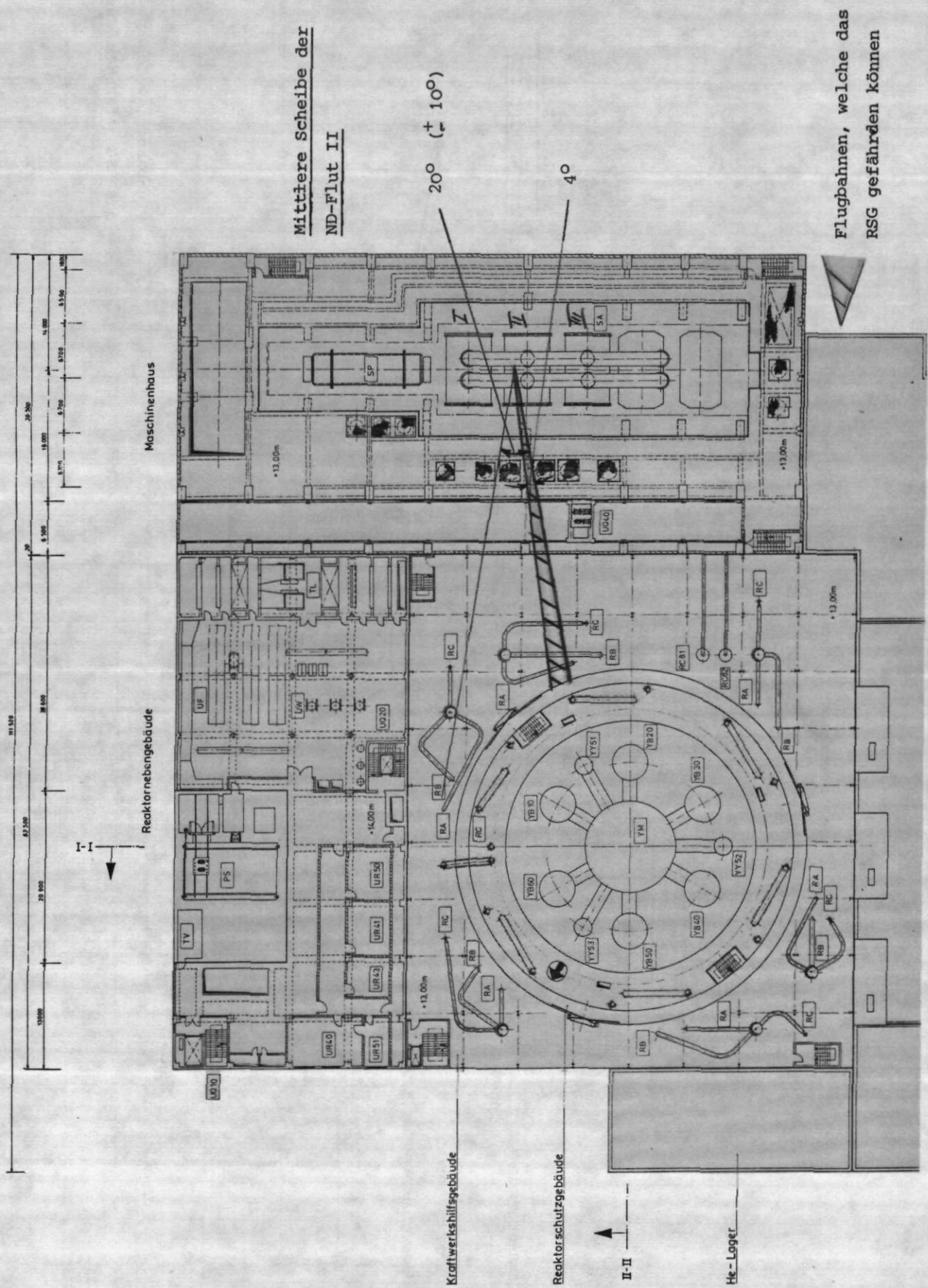


Bild 12: Wirkungsbereiche von Turbinenbruchstücken

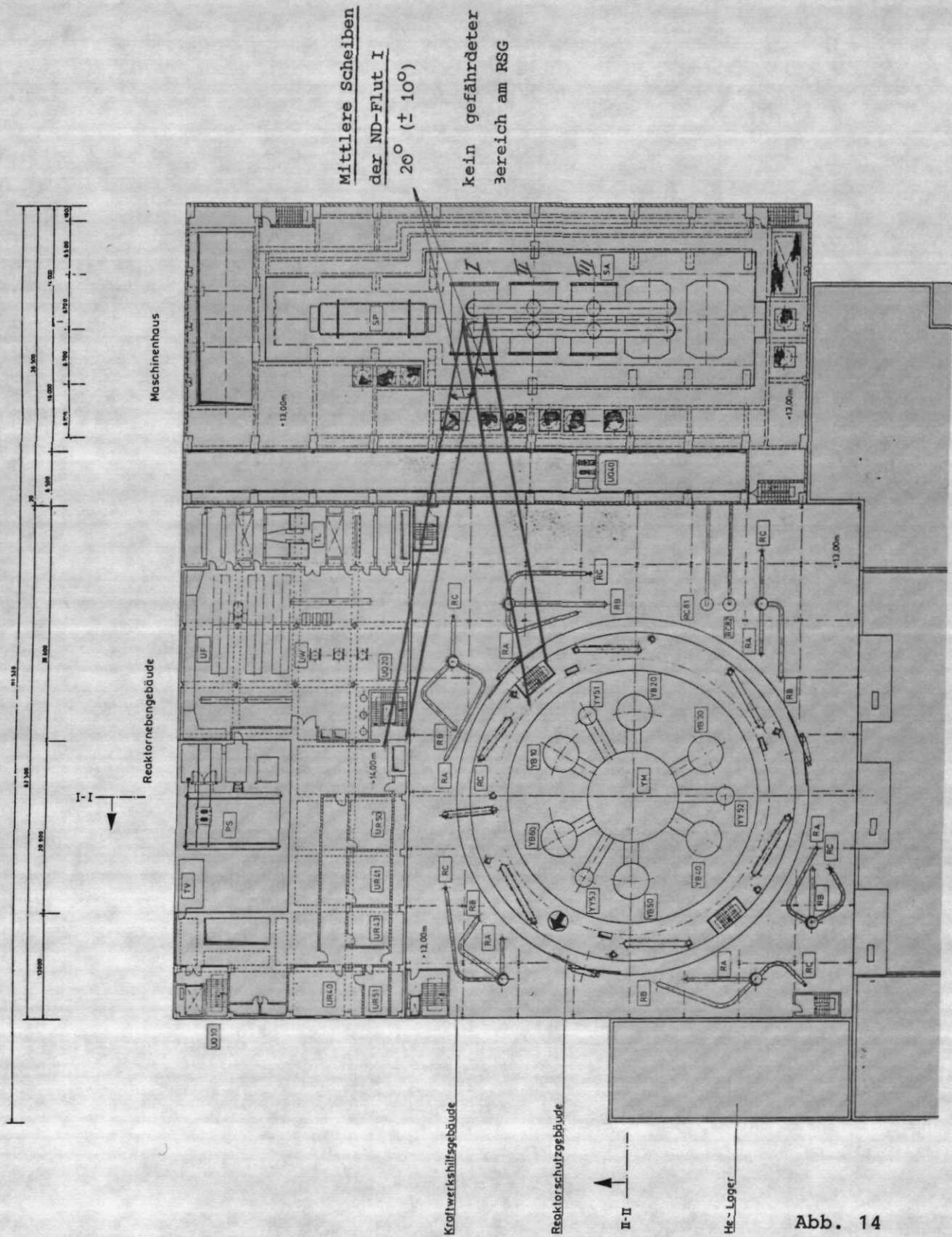


Bild 14: Wirkungsbereiche von Turbinenbruchstücken

